

Anhang 4: Anmerkungen zum Forschungsbedarf vor Beginn des Workshops

Anmerkungen von Frau Dr. Eckhardt:

Forschungsbedarf Standortauswahl der BGE

Workshop vom 19./20. März 2019

Vorschlag zur interdisziplinären Aufweitung von Forschungsthemen von Dr. Anne Eckhardt, risicare GmbH, CH-Zollikerberg

1. Standortsuche und Raumplanung

- a. Forschung zum **Schutzbereich des Endlagers im geologischen Untergrund**, d.h. dem Bereich, der raumplanerisch im Untergrund für das Lager ausgeschieden werden muss. Diese Forschung muss notwendigerweise zunächst auf generischer Basis erfolgen. Mit der Forschung sollen insbesondere Erkenntnisse dazu gewonnen werden, welche Wechselwirkungen mit anderen zukünftig zu erwartenden oder möglichen Nutzungen des Untergrunds bestehen könnten und wie diese Wechselwirkungen bei der Festlegung eines Schutzbereichs in unterschiedlichen Wirtsgesteinen und geologischen Situationen zu berücksichtigen sind. Zudem sollte ein Bezug zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. zum einschlusswirksamen Bereich hergestellt werden. Die Forschung erfordert die Entwicklung zukunftsgerichteter Szenarien für Nutzungskonflikte wie Gewinnung von Primärrohstoffen und Konflikte mit anderen Schutzansprüchen, beispielsweise von Geotopen. Folgerungen für die Ausscheidung des Schutzbereichs und die entsprechende Raumplanung im Untergrund sowie über Tage sollten dargelegt werden.
- b. Untersuchung, ob **Markierung** ein geeigneter Ansatz ist, um Human Intrusion zu vermeiden oder welche anderen Ansätze für die Vermeidung von Human Intrusion infrage kommen, wenn die Information über das Lager verloren gegangen sein sollte. Falls eine dauerhafte Markierung des Lagers in Erwägung gezogen wird, Klärung der raumplanerischen Konsequenzen und der Frage, wie dieser Aspekt im Standortauswahlverfahren berücksichtigt wird.

2. Endlagerkonzepte

- a. **Vorkehrungen für den Fall gesellschaftlicher Krisensituationen** bei der stufenweisen Konkretisierung des Endlagerkonzepts. Dazu könnten zunächst relevante Formen gesellschaftlicher Krisensituationen erhoben, eingeordnet und deren Auswirkungen auf die Sicherheit eines Endlagers ermittelt werden. Anschließend werden – zunächst generische – Sicherheitsmaßnahmen skizziert und evaluiert wie etwa die schnelle Verbringung der noch nicht einlagerten Behälter nach unter Tage oder ein (provisorischer) Schnellverschluss des Lagers. Ein wesentliches Ziel des Forschungsprojektes ist es, die generelle Robustheit der Endlagerkonzepte zu stärken.
- b. Forschung zu **alternativen Behältermaterialien** vor dem Hintergrund zukunftsgerichteter Entwicklungen der Materialwissenschaften. Einordnung der Forschungsergebnisse in das Sicherheitskonzept für Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinen. Berücksichtigung möglicher Vor- und Nachteile der Materialwahl für das Monitoring des Endlagers, zum Beispiel wenn «smarte» Endlagerbehälter vorgesehen werden sollten.

3. Monitoring

- a. **Gesellschaftliche Erwartungen** an die Sicherheit und Kontrollierbarkeit eines Endlagers. Welche Anforderungen an das Monitoring-Konzept lassen sich daraus ableiten? Wie können diese Anforderungen mit einem technisch-naturwissenschaftlich begründeten Monitoring-Konzept in Einklang gebracht werden? Welche Hinweise geben die Forschungsergebnisse zur Durchführung des Monitorings? Die Ergebnisse dieser Forschung, die sich vertieft mit den Anforderungen und Bedürfnissen der Stakeholder auseinandersetzt, können eine Grundlage für die von der BGE vorgesehene Strategie- und Konzeptentwicklung für die Einbindung von Interessensgruppen in die Entwicklung von Monitoring-Programmen für ein Endlager-Monitoring bilden («Forschungs- und Entwicklungsbedarf Standortauswahlverfahren. Sicht des Vorhabenträgers», Seite 35).
- b. Anforderungen an das **Monitoring als Entscheidungsgrundlage** aus gesellschaftlicher und technisch-naturwissenschaftlicher Perspektive: Interdisziplinäre Untersuchung zur Notwendigkeit von Entscheidungskriterien («Abbruchkriterien»), zur Ausgestaltung von Entscheidungsprozessen, Fragen der Governance etc. Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das geplante Monitoring-Konzept der BGE.

4. Sicherheitskultur

- a. **Sicherheit im Spannungsfeld mit Effizienz und Akzeptanz.** Eine gute Sicherheitskultur zeichnet sich wesentlich durch eine hinterfragende Grundhaltung aus. Untersuchungen zu Unfällen in Kernkraftwerken, darunter dem sehr schweren Unfall von Fukushima Daiichi, von Unfällen in der Luftfahrt, der Raumfahrt und in anderen sicherheitsrelevanten Bereichen zeigen auf, dass nicht-sicherheitsgerichtetes Verhalten häufig auf Ziel- und Interessenkonflikte zurückgeht. Diese Ziel- und Interessenkonflikte können eine grundsätzlich vorhandene hinterfragende Grundhaltung überlagern und im ungünstigen Fall unwirksam machen. Wesentlich ist daher eine klare Positionierung der Sicherheit innerhalb von Organisationen wie der BGE, die Verantwortung für die Sicherheit tragen. Angesichts des großen politischen Gewichts, das gegenwärtig der Nachhaltigkeit zukommt, sollte diese Positionierung insbesondere im Kontext eines Nachhaltigkeitsansatzes erfolgen. Dies bedeutet vor allem, Konflikte im Dreieck der erwünschten Ziele «Sicherheit», «Effizienz», «Akzeptanz» auszuloten. Die Forschungsergebnisse bilden eine Grundlage, auf der sich die BGE nach innen und außen entsprechend positionieren kann.

5. Kommunikation mit Stakeholdern

- a. Forschung zum vertieften **Verständnis der Informations- und Kommunikationsbedürfnisse** der wichtigen Stakeholder im Standortauswahlverfahren unter besonderer Berücksichtigung der sicherheitsrelevanten Fragen. Dabei können sowohl die bisherigen Erfahrungen in Deutschland als auch internationale Erfahrungen, zum Beispiel mit dem Technischen Forum Sicherheit in der Schweiz, ausgewertet werden.
- b. Untersuchung der Rolle, die **Visualisierungen zum Endlagerkonzept** bei der Standortauswahl und auf dem weiteren Entsorgungspfad zukommen soll. Visualisierungen sind wesentlich, um das Endlagerkonzept zu verdeutlichen. Sie bergen aber auch die Gefahr in sich, sich aufgrund ihrer Anschaulichkeit im gesellschaftlichen Diskurs zu «verselbständigen» und den Anschein

verfrühter Festlegungen zu erwecken. Damit erschweren sie es potentiell, den Grundsatz der schrittweisen Konkretisierung des Endlagers («Entscheidungen zu spät wie möglich und so früh wie nötig treffen») umzusetzen. Mit einem Forschungsprojekt können Grundlagen zur Gestaltung und Verwendung von Visualisierungen durch die BGE entwickelt werden.

- c. **Junge Menschen erreichen.** Einen Forschungsschwerpunkt kann zudem die Frage bilden, wie sich junge Menschen wirksam ansprechen lassen. Beim 10. Länderworkshop des Forums on Stakeholder Confidence der Nuclear Energy Agency zeigte sich beispielhaft, dass dabei nicht nur spezifische Medien und neue Darstellungsformen eine Rolle spielen müssen, sondern es auch darum geht, die Werthaltungen und Interessen junger Menschen zu verstehen. Mit entsprechender Forschung würde ein Bezug zur Forschungsagenda der BfE hergestellt, die die « Einbindung der jungen Generation in das Standortauswahlverfahren» vorsieht.

6. Mikrobiologische Einflüsse

Die **Geomikrobiologie** entwickelt sich gegenwärtig unter anderem mit Initiativen wie dem «Deep Carbon Observatory» und dem «Census of deep life» weiter. Biologische Prozesse im Endlager können sich beispielsweise auf die Korrosion von Endlagerbehältern und Ausbaumaterialien und die Gasentwicklung im Endlager auswirken. Daher scheint es angebracht, den im Dokument «Forschungs- und Entwicklungsbedarf Standortauswahlverfahren. Sicht des Vorhabenträgers» angesprochenen biologischen Prozessen ausreichende Aufmerksamkeit zu schenken – auch wenn sich die Vielfalt biologischer Lebensformen und Prozesse nur schwer erfassen lässt und aufgrund der Anpassungsfähigkeit von Mikroorganismen an neue Umweltbedingungen ein «moving target» darstellen kann.

Für ein Interview stehe ich bei Bedarf gerne zur Verfügung.

Anmerkungen von Herrn Prof. Dr. Röhlig:

K.-J. Röhlig (TU Clausthal): Kommentare zu „Forschungs- und Entwicklungsbedarf Standortauswahlverfahren. Sicht des Vorhabenträgers“ (BGE 2019)

März 2019

Allgemeines

Nach Auffassung des Verfassers dieser Kommentare werden im Dokument die für die Standortauswahl wichtigen naturwissenschaftlich-technischen FuE-Themen benannt und in ausreichender Tiefe diskutiert. Die zeitliche Einordnung / Priorisierung von Forschungsthemen entlang des Standortauswahlprozesses ist ein wesentliches Verdienst des Dokuments, auch wenn diesbezügliche Begründungen oft zu kurz kommen (s. u.). Von dieser grundsätzlich positiven Bewertung ausdrücklich ausgenommen ist Kapitel 2.5 (vgl. die Anmerkungen dazu im Text).

Konzepte (Sicherheitskonzept, Nachweiskonzept, Endlagerkonzept) als Ausgangspunkt der FuE-Planung

Es erscheint sinnvoll, konzeptionelle Überlegungen zum Ausgangspunkt der FuE-Planung zu machen. Zumindest die Entwicklung von Sicherheitskonzepten (z. T. auch von Nachweiskonzepten) ist eine grundlegende Voraussetzung sowohl für geowissenschaftliche als auch für ingenieurwissenschaftliche FuE-Arbeiten und sollte daher in der Darstellung an den Anfang gestellt werden. Die Aufzählung in Abschnitt 2.4.1.1 greift diesbezüglich auch deutlich zu kurz: Sie zielt fast ausschließlich auf Nachweisaspekte (also auf das Nachweiskonzept), während Maßnahmen zum Erreichen von Sicherheit (Sicherheitskonzept) praktisch nicht vorkommen. Einzelne Aspekte des Sicherheitskonzepts sind in Abschnitt 2.3 (z. B. 2.3.5) implizit angesprochen – was fehlt ist aber eine übergeordnete Darlegung etwa im Sinne der VSG (<https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-277.pdf> Kap. 3.2 und grundlegende Gedanken in 3.3). Von dieser könnte dann sinnvoll eine Einordnung / Priorisierung von FuE-Themen abgeleitet werden. Dann würde beispielsweise auch deutlicher werden, welche zentrale Rolle die Behälterentwicklung spielt – insbesondere, aber nicht nur für kristallines Hartgestein bei einem Konzept ohne ewG. Dem Verfasser ist aus dem Dokument nicht deutlich geworden, ob die BGE die Bedeutung und Dringlichkeit dieses Themas unterschätzt oder ob diesbezüglich lediglich ein Defizit in der Darstellung besteht.

Darstellung und Verständlichkeit

Dem Verfasser ist bewusst, dass das BGE-Dokument zur Forschung und Entwicklung auch in dem Bemühen entworfen wurde, Leser nicht quantitativ zu überfordern: 71 Seiten sind nicht viel, um die FuE-Pläne im Zusammenhang mit der Standortauswahl zu beschreiben, andererseits sollte vermutlich die Aufnahmefähigkeit und –willigkeit der Leser vor dem März-Workshop nicht übermäßig strapaziert werden. Daher versteht der Verfasser den gewählten Umfang als einen Versuch der Balance zwischen den beiden Ansprüchen: Abdeckende Darstellung versus Zumutbarkeit. Trotzdem ist der Verfasser der Auffassung, dass die Darstellung unter der Entscheidung für Knappheit signifikant leidet. Dies betrifft zwei Aspekte:

Zum einen ist das Dokument nur für Personen verständlich, die sowohl wissen, wie Endlagersysteme in unterschiedlichen Wirtsgesteinen funktionieren, als auch die einschlägigen laufenden Forschungsprojekte zumindest in ihren Grundzügen kennen (letzteres bezieht sich vor allem auf die kommentarlose Aufführung von Projekt-Akronymen in den Tabellen). Besteht die Zielgruppe ausschließlich aus solchen Personen? Könnte ein Anhang Abhilfe schaffen und das Dokument für einen weiteren Personenkreis lesbar machen?

Zum anderen sind die Einordnungen / Priorisierungen von Forschungsthemen in den Tabellen für den Leser schwer nachvollziehbar. Der Verfasser empfiehlt für eine zu veröffentlichende Fassung die Voranstellung eines knappen „strategischen Kapitels“: Welche Prinzipien liegen den Entscheidungen zu Einordnungen / Priorisierungen zugrunde? Anhand der jeweiligen Tabellen müsste dann in den einzelnen Kapiteln kurz begründet werden, was die jeweilige Grundlage für Entscheidungen zu Einordnungen / Priorisierungen war. Es sollte auch erläutert werden, welche planerischen Konsequenzen eine Einordnung in „Grundlagenforschung“ hat. Häufig entsteht der Eindruck, dass die Ergebnisse solcher Grundlagenforschung in allen Phasen der Standortauswahl benötigt werden. Da sie aber vermutlich nicht in vollem Umfang rechtzeitig zur Verfügung stehen werden, wird man in frühen Phasen u. U. auf diesbezügliche Annahmen angewiesen sein (z. B. zum Thema: „Was wird der Behälter wirklich können?“). Die diesbezügliche Vorgehensweise / strategische Planung wird im Dokument nicht expliziert.

[Zu den nachfolgenden Kommentaren im pdf](#)

Aufgrund von Zeitknappheit wurde das Dokument lediglich einmal gelesen und sequentiell beim Lesen direkt im pdf kommentiert. Daher gibt es Sachverhalte, die sich beim Weiterlesen in einem anderen Licht darstellten als im Moment des jeweiligen Kommentierens. Solche Kommentare wurden aus Zeitgründen nur gelegentlich, aber nicht systematisch im Nachgang aufgelöst, insofern ist das kommentierte Dokument nicht das Ergebnis eines systematischen und abgeschlossenen Reviews. Allerdings sollten derartige Kommentare von der BGE als Hinweise bzgl. der Darstellungsweise verstanden werden: Je weniger Missverständnisse beim Lesen entstehen, desto besser. Wo derartige Missverständnisse entstehen, gibt es prinzipiell drei Möglichkeiten: (i) Ausführlicher erklären, (ii) Verweis auf Nachfolgendes, (iii) Struktur umstellen.

Der Verfasser hat sich auch die Freiheit genommen, einige redaktionelle Kleinigkeiten mit pdf-Korrekturvorschlägen zu versehen.

Die grundsätzlich positive Einschätzung unter „Allgemeines“ (s. o.) wird durch die scheinbare Vielzahl an Kommentaren zum Detail nicht eingeschränkt.



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Forschungs- und Entwicklungsbedarf Standortauswahlverfahren

Sicht des Vorhabenträgers

Geschäftszeichen: BGEA0771/01#0001/001

Revision: 00

Stand: 25.02.2019

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	8
1.1	Vorhabenträgerin des Standortauswahlverfahrens	8
1.2	Gegenstand und Zielsetzung	8
1.3	Phasen des Standortauswahlverfahrens.....	8
1.4	Abgrenzung	9
2	Forschungsbedarf.....	9
2.1	Inventar an radiotoxischen und chemotoxischen Abfällen.....	9
2.1.1	Arten von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen	10
2.1.2	Inventar wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle	10
2.2	Geowissenschaftliche Fragestellungen.....	11
2.2.1	Standortinformation	11
2.2.2	Geowissenschaftliche Prognose	12
2.2.3	Geologische Modelle	13
2.2.4	Referenzdatensatz	15
2.2.5	Erkundungsprogramm und Erkundungsmethoden.....	16
2.2.6	Integritätsnachweise geologische Barrieren.....	18
2.2.6.1	Nachweisrelevante Prozesse in der geologischen Barriere.....	18
2.2.6.2	Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle).....	20
2.2.6.3	Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise	22
2.2.6.4	Sonderfall: Gasmenge, Gasbildung und Gaspfad	23
2.3	Endlagerkonzepte.....	24
2.3.1	Behälterkonzept.....	24
2.3.2	Endlagerauslegung und Design.....	26
2.3.3	Endlagertechnik.....	28
2.3.4	Tagesanlagen.....	30
2.3.5	Verfüll- und Verschlusskonzept.....	31
2.3.6	Rückholungs- und Bergungsaspekte	34
2.3.7	Monitoring.....	35
2.3.8	Betriebssicherheit	38
2.4	Sicherheitsbetrachtungen	40
2.4.1	Sicherheitsstrategie	40
2.4.1.1	Generelles Sicherheits- und Nachweiskonzept	40
2.4.1.2	Regulatorische Aspekte	41
2.4.1.3	Sicherheitsnachweis	41

2.4.1.4	Lernendes selbsthinterfragendes Verfahren	42
2.4.1.5	Vergleich von Endlagersystemen.....	42
2.4.2	FEP-Kataloge und Szenarienentwicklung	43
2.4.2.1	FEP-Katalog	44
2.4.2.2	Szenarienentwicklung.....	45
2.4.3	Integritätsnachweise geotechnische Barrieren.....	46
2.4.3.1	Einwirkende Prozesse auf das Barriersystem	47
2.4.3.2	Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle).....	50
2.4.3.3	Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise	52
2.4.4	Radiologische Konsequenzenanalyse	54
2.4.4.1	Migrationsprozesse von Lösungen und Gasen	55
2.4.4.2	Mobilisierung, Transport und Rückhaltung von Radionukliden.....	57
2.4.4.3	Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffgesetze).....	60
2.4.4.4	Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise	61
2.4.5	Kritikalitätsausschluss.....	63
2.4.6	Safeguards	64
2.5	Sozialwissenschaften	64
2.5.1	Transparenz und Ergebnis-/Wissensvermittlung.....	65
2.5.2	Sozioökonomische Potenzialanalysen	65
3	Literaturverzeichnis.....	66

Tabellenübersicht

Tabelle 1: Forschungsbedarf zu den Arten und Inventar an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle.	9
Tabelle 2: Forschungsbedarf Standortinformation.....	11
Tabelle 3: Forschungsbedarf geowissenschaftliche Prognose.	12
Tabelle 4: Forschungsbedarf geologische Modelle.	13
Tabelle 5: Forschungsbedarf Referenzdatensatz.....	15
Tabelle 6: Forschungsbedarf Erkundungsprogramm und –methoden.	16
Tabelle 7: Forschungsbedarf Prozesse in der geologischen Barriere.....	18
Tabelle 8: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle).	20
Tabelle 9: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise.	22
Tabelle 10: Forschungsbedarf Sonderfall: Gasmenge, Gasbildung und Gaspfad.	23
Tabelle 11: Forschungsbedarf Behälterkonzept.	24
Tabelle 12: Forschungsbedarf Endlagerauslegung und Design.	26
Tabelle 13: Forschungsbedarf Endlagertechnik.	28
Tabelle 14: Forschungsbedarf Tagesanlagen	30
Tabelle 15: Forschungsbedarf Verfüll- und Verschlusskonzept.	31
Tabelle 16: Forschungsbedarf Rückholungs- und Bergungsaspekte.....	34
Tabelle 17: Forschungsbedarf Monitoring.	35
Tabelle 18: Forschungsbedarf Betriebssicherheit.	38
Tabelle 19: Forschungsbedarf generelles Sicherheits- und Nachweiskonzept.	40
Tabelle 20: Endlagerforschung Regulatorische Aspekte.	41
Tabelle 21: Forschungsbedarf lernendes und selbsthinterfragendes Verfahren.	42
Tabelle 22: Forschungsbedarf Vergleich von Endlagersystemen.	42
Tabelle 23: Forschungsbedarf FEP-Katalog.	44
Tabelle 24: Forschungsbedarf Szenarienentwicklung.	45
Tabelle 25: Forschungsbedarf einwirkende Prozesse auf das Barriersystem.....	47
Tabelle 26: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle).	50
Tabelle 27: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise.	52
Tabelle 28: Forschungsbedarf Migrationsprozesse von Lösungen und Gasen.....	55
Tabelle 29: Forschungsbedarf Mobilisierung, Transport und Rückhaltevermögen von Radionukliden.	57
Tabelle 30: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffgesetze).	60
Tabelle 31: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise.	61
Tabelle 32: Forschungsbedarf Kritikalitätsausschluss.	63
Tabelle 33: Forschungsbedarf Safeguards.	64

Abkürzungsverzeichnis

ANSICHT	FuE-Vorhaben „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein“
ANSICHT-II	FuE-Vorhaben „Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland“
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
BbergG	Bundesberggesetz
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGE TEC	BGE TECHNOLOGY GmbH
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CAD	Computer-Aided Design
CASTOR- Behälter	cask for storage and transport of radioactive material, Behälter zur Aufbewahrung und zum Transport radioaktiven Materials
CHRISTA-II	FuE-Vorhaben „Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland“
CSD-B	Colis Standard des Déchets Boues, verglaste mittelradioaktive Abfälle (Dekontaminations- und Spülwässer)
CSD-C	Colis Standard des Déchets Compactés, hochdruckkompaktierte mittelradioaktive Abfälle (Brennelementhüllrohrstücke, Strukturteile und Technologieabfälle)
CSD-V	Colis Standard des Déchets Vitriés, verglaste hochradioaktive Spaltprodukte und Feedklärschlämme)
DepV	Deponieverordnung
DOPAS	EU-Projekt „Full-Scale Demonstration of Plugs and Seals“
EMR	Elektromagnetische Reflexionsmessungen
ERAM	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
ewB	einschlusswirksamer Bereich
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEP	features, events, processes
FuE	Forschung und Entwicklung
HAW	High Active Waste, hoch radioaktiver Abfall

ICRP	International Commission on Radiological Protection; Internationale Strahlenschutzkommission
IAEA	International Atomic Energy Agency, Internationale Atomenergie-Organisation
ISIBEL	Projekt „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“
KBS-3	kärnbränslesäkerhet, Technologie für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen der SKB in Schweden
KOBRA	FuE-Vorhaben „Anforderungen für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein“
KOMPASS	Verbundprojekt „Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss“
KOSINA	Verbundprojekt „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes“
LWR	Leichtwasserreaktor
MODERN2020	EU-Projekt „Entwicklung von Überwachungskonzepten für HAW Endlager auf europäischer Ebene“
MOSAIK-Behälter	Spezialbehälter für den Transport und die Lagerung von schwach- bis hochradioaktiven Abfällen
NEA	Nuclear Energy Agency, zwischenstaatliche Institution innerhalb der OECD
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development, Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
POLLUX-Behälter	Spezialbehälter für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente aus Kernkraftwerken
RESUS	FuE-Vorhaben „Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle“
RGI	Radiologischer Geringfügigkeitsindex
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company
SR	Standortregionen
STA	Bereich Standortauswahl der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

StandAG	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz)
StrlSchG	Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz)
THM	thermisch-hydraulisch-mechanisch
THMC	thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch
TLB	Transport- und Lagerbehälter
UPC	Polytechnic University of Catalonia
VerA	Projekt „Vergütung der Auflockerungszone im Salinar“
VIRTUS	Projekt „Virtuelles Untertagelabor für Salzformationen“; Entwicklung eines Programms für die Visualisierung und Analyse gekoppelter thermisch-hydraulisch-mechanischer Prozesse in einem geologischen Endlager, Darstellung der geologischen Struktur und des Grubengebäudes
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

1 Einführung

1.1 Vorhabenträgerin des Standortauswahlverfahrens

Die BGE ist gemäß der Aufgabenübertragung durch das BMU vom 24.04.2017 mit der Umsetzung des Standortauswahlverfahrens beauftragt. Damit wird sie als Vorhabenträgerin nach dem StandAG mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten den Stand von Wissenschaft und Technik kontinuierlich fortzuschreiben und einen substantiellen Beitrag zu Aufbau, Weiterentwicklung und Erhalt der wissenschaftlich-technischen Kompetenz sowie zur Nachwuchsförderung leisten.

1.2 Gegenstand und Zielsetzung

Nach einer ersten Bewertung im Jahr 2017 des Forschungs- und Entwicklungsbedarfes für die Aufgaben der BGE im Standortauswahlverfahren wurden bereits Anfang 2018 erste Forschungs- und Entwicklungsarbeiten angestoßen. Zudem wurde die BGE TEC gebeten, in Zusammenwirken mit der BGE den Bedarf Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu ermitteln und zeitlich einzuordnen; was Gegenstand des vorliegenden Berichtes ist.

Im Austausch mit Experten der deutschen Enlagerforschung soll der bisher festgestellte Forschungs- und Entwicklungsbedarf kritisch hinterfragt und weiterentwickelt werden.

Ziel der Bedarfsermittlung ist, diesen in dem Forschungsprogramm der BGE mit einfließen zu lassen und im Zusammenwirken mit den Forschungsressorts in Deutschland termingerecht und fachlich exzellent umzusetzen.

1.3 Phasen des Standortauswahlverfahrens


Die zeitliche Einordnung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs erfolgt anhand der Phasen des Standortauswahlverfahrens. Dabei wird die Phase I in den Schritt 1 „Zwischenbericht Teilgebiete“ und dem Schritt 2 „Bericht Standortregionen“ unterteilt (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Schematische Darstellung der Phasen des Standortauswahlverfahrens.

1.4 Abgrenzung 1

Vorliegender Forschungsbedarf für das Standortauswahlverfahren berücksichtigt den Aufgabenanteil am Standortauswahlverfahren, der durch die BGE umgesetzt wird.


Das Forschungsprogramm der BGE wird neben dem Forschungsbedarf der Standortauswahl auch den jeweiligen Bedarf an Forschung und Entwicklung aus den anderen Aufgabenbereichen der BGE enthalten. Synergien werden genutzt. 

2 Forschungsbedarf

2.1 Inventar an radiotoxischen und chemotoxischen Abfällen

Tabelle 1: Forschungsbedarf zu den Arten und Inventar an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle.

Kapitel 2.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertä- gige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicher- heits-untersuchun- gen	Übertägige Er- kundung Weiterführende vorläufige Si- cherheits-untersuchungen	Untertägige Er- kundung Umfassende vorläufige Si- cherheits-untersuchungen	
Ermittlung der Arten, Mengen und Aktivitäten für alle zu berücksichtigenden Abfalltypen inklusive sonstiger wassergefährdende Stoffe und Entwicklung einer zugehörigen Datenbank		X			
Aufnahme des Schutzziels des Wasserhaushaltskonzepts in das bestehende Sicherheits- und Nachweiskonzept und Ermittlung wie das Schutzziel umgesetzt werden kann					X

In Deutschland werden die radioaktiven Abfälle bei der Endlagerung in wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung unterteilt. Zu den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen zählen die hochradioaktiven Abfälle und auch ein Teil der mittelradioaktiven Abfälle aufgrund deren Wärmeabgabe. Zu den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung gehören die schwachradioaktiven Abfälle und der Großteil der mittelradioaktiven Abfälle. 

Zu den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen zählen die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen (CSD-B/-C/-V) und die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren, den Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie den Forschungsreaktoren.

Neben der Radiotoxizität können die radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente auch chemotoxische Stoffe enthalten. Diese können zu den wassergefährdenden Stoffen gemäß Wasserhaushaltsgesetz (WHG 2017) zählen. In diesem Fall ist gemäß (WHG 2017) der Schutz der Gewässer gegen nachteilige Veränderungen ihrer Eigenschaften durch den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen zu gewährleisten, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Stoffe in Lösung treten und mit dem Tiefenwasser möglicherweise in oberflächennahes Grundwasser gelangen können.

Seite: 14

-
- ☞ Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 28.02.2019 17:33:00 +01'00'
Auch Entwicklungsbedarf?
-
- ☞ Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 28.02.2019 17:33:41 +01'00'
Es müsste auch eine Abgrenzung oder eine Positionierung zur Forschung anderer Akteure erfolgen.
-
- ☞ Nummer: 3 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 28.02.2019 17:36:04 +01'00'
Ich vermute, dass das Thema zeitlich so eingeordnet wurde, weil dann die erste vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen vorliegen müssen. Das ist vollkommen richtig, sollte aber erläutert werden.
-
- ☞ Nummer: 4 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 28.02.2019 17:41:07 +01'00'
Die Zuordnung zum Themenbereich "Inventar" ist nur in Teilen nachvollziehbar: Die Inventarermittlung und hier insbesondere die Zusammenstellung "sonstiger wassergefährdende[r] Stoffe" ist natürlich eine Voraussetzung für das Untersuchungsthema, aber dies ist ja bereits im vorangehenden Untersuchungsthema abgedeckt. Geht es hier nicht eher um grundsätzliche methodische Fragestellungen? Einordnung also eher unter 2.4.1.1 oder 2.4.1.3?
-
- ☞ Nummer: 5 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 28.02.2019 17:49:52 +01'00'
Angesichts der Formulierungen im StandAG 2017 fragt sich, in wie weit diese Aussage noch haltbar ist. Dort ist durchgängig von hochradioaktiven bzw. schwach- und mittelaktiven Abfällen die Rede. Müsste man die eigene Kategorisierung entsprechend anpassen? Möglichst auch Konsistenz mit dem BMU-Abfallverzeichnis Kap. 2.2 herstellen bzw. auf eine solche im Rahmen von Aktualisierungen des Abfallverzeichnisses hinwirken? Diesbezügliche Konsistenz würde die eigene Arbeit erleichtern, aber auch bzgl. der Wahrnehmung in der interessierten Öffentlichkeit hilfreich sein.

2.1.1 Arten von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen

FuE-Bedarfe:

Die Auslegung eines Endlagers und dessen Betrieb werden maßgeblich vom Inventar an radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen sowie den Behältern, die für die Endlagerung dieser Abfälle erforderlich sind, bestimmt. Somit ist die detaillierte Kenntnis des zu berücksichtigenden Abfallinventars und des vorgesehenen Endlagerbehälters von besonderer Bedeutung. Der FuE-Bedarf ergibt sich aus der Tatsache, dass in Deutschland noch Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren in Betrieb sind und daher nur eine Prognose zur Menge und zum Inventar an ausgedienten Brennelementen ermittelt werden kann. Falls nicht bereits vorhanden wird empfohlen, eine Abfalldatenbank zu erstellen bzw. fortzuführen, in der der aktuelle Stand sowie die Prognose der endzulagernden radioaktiven Abfälle erfasst und über den Zeitraum der Zwischenlagerung fortgeschrieben wird.

2.1.2 Inventar wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle

FuE-Bedarfe:


Das radiologische und stoffliche Inventar der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente ist nur zum Teil vorhanden. Eine Aufnahme dieser Daten in einer Abfalldatenbank inklusive regelmäßiger Aktualisierung ist sinnvoll. Gleiches gilt für chemotoxischen Stoffe. Hierbei sollten nicht nur die Inventare aus den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen und ihrer Behälter, sondern auch alle anderen Materialien, die in einem Endlager verbaut werden (z. B. Verfüll- und Verschlussmaterialien), aufgenommen werden.


Bislang ist der Nachweis zur Einhaltung des Schutzziels des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG 2017) noch nicht Bestandteil des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. Es ist zu klären, wie dieses Schutzziel in das Sicherheits- und Nachweiskonzept aufgenommen werden kann. Im Vorhaben "Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle" (Alt et al. 2009) wurde festgestellt, dass es zwei Varianten gibt, um die Einhaltung des Schutzzieles zu gewährleisten. Die eine Variante ist, dass der Nachweis als Analogie zu den Regelungen der "Verordnungen über Deponien und Langzeitlager" (Deponieverordnung) (DepV 2017) geführt werden kann. Die andere Variante ist der Nachweis der Geringfügigkeit der Grundwasserveränderung. Es ist zu prüfen welche Variante bevorzugt wird. Für ein Endlager im Kristallingestein wurden die chemotoxischen Stoffe bislang noch nicht zusammengestellt, was nachgeholt werden sollte.


Teilweise werden wärmeentwickelnde Abfälle mehrere Jahrzehnte zwischengelagert werden. Über die radiochemische Entwicklung in den zwischengelagerten Abfällen liegen keine gesicherten Informationen vor. Hier ist zunächst der internationale Kenntnisstand zu erheben, um weiterführende Forschung und Maßnahmen ableiten zu können.

Seite: 15

 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Eingefügter Text Datum: 28.02.2019 17:51:44 +01'00'
bekannt

 Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 04.04.2019 12:04:54
Ist das dieselbe Datenbank, die unter 2.1.1 empfohlen wird? Das wäre sicher sinnvoll, und dann bietet sich eine Verschmelzung von 2.1.1 und 2.1.2 an.

 Nummer: 3 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 04.04.2019 12:04:55
Diskussionsbedarf: Der Wissensstand bzgl. der stofflichen Inventare der "anderen Materialien" ist deutlich geringer. Außerdem muss über weite Strecken des Standortauswahlverfahrens mit mehreren Endlagerkonzepten gearbeitet werden, also auch mit mehreren Varianten zu diesen Inventaren, die sich mit Fortschreiten der Endlagerplanung auch noch ändern werden. Dies gilt in gewissem Maß auch für die Behälter. Ist es wirklich methodisch sinnvoll, diese Inventare genauso zu behandeln wie die Inventare der "eigentlichen Abfälle"? Moderne Datenbanksysteme ermöglichen dies vielleicht in sinnvoller Weise, aber in jedem Fall sind methodische Vorab-Klärungen notwendig.

 Nummer: 4 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 28.02.2019 21:35:51 +01'00'
s. Anmerkung an der Tabelle weiter oben: Das fällt eher unter Nachweiskonzept.

2.2 Geowissenschaftliche Fragestellungen

2.2.1 Standortinformation

Tabelle 2: Forschungsbedarf Standortinformation.

Kapitel 2.2.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertä- gige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicher- heitsuntersuchun- gen	Übertägige Erkundung Weiterfüh- rende vor- läufige Si- cherheits- untersu- chungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsun- tersuchungen	
Steinsalz/Tongestein/ Kristallingestein: Spezifizierung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs, der für die wiederholte Anwendung der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien benötigt wird.	X	X	X	X	
Spezifizierung und Aktualisierung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs, der für die Durchführung der dreistufigen Sicherheitsuntersuchungen benötigt wird		X	X		

Die Standortinformation beschreibt die geologische, strukturgeologische und die hydrogeologische Situation an einem Standort. Das erforderliche Verständnis für die standortspezifische geologische Struktur und deren Entwicklung ergibt sich aus der Interpretation der vorhandenen geologischen Daten und deren Betrachtung im Kontext der geowissenschaftlichen Langzeitprognose.

Für die wiederholte Anwendung der gesetzlich vorgegebenen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sowie zur Durchführung der dreistufigen Sicherheitsuntersuchungen muss im Rahmen von FuE-Tätigkeiten der benötigte geowissenschaftliche Informationsbedarf ermittelt werden.

Die wissenschaftlich-technische Grundlage für die Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen für die Teilgebiete soll das laufende FuE-Projekt RESUS bilden, in welchem eine einheitliche Vorgehensweise, sog. prototypische Sicherheitsuntersuchungen, entwickelt wird. Ausgehend von diesen Ergebnissen sollte anschließend der benötigte geowissenschaftliche Informationsbedarf abgeleitet werden. Insbesondere im Kristallin ist der geowissenschaftliche Informationsbedarf für die im Kristallin angedachten Sicherheitskonzepte, welche auf einer unterschiedlichen Relevanz der verschiedenen Barrieren (Behälter, geotechnische Barrieren, Wirtsgestein, Deckgebirge) basieren, getrennt zu erfassen.



Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 28.02.2019 21:44:08 +01'00'

Das ist m. E. zu einseitig formuliert: Der Informationsbedarf als "Wunschliste". Entscheidend ist aber die Gegenüberstellung mit den Möglichkeiten, die Informationen in der jeweiligen Phase zu erheben. Was für Möglichkeiten eröffnen sich aus Papierstudien, aus Erkundungen von über bzw. von unter Tage? Hierzu Diss. Eva Krapf (2016) zu Salz in steiler Lagerung und laufendes TUC-Promotionsprojekt zu kristallinem Hartgestein. Eine weiter führende Frage wäre FuE-Bedarf zu den Erkundungsmethoden selbst - welches Verbesserungspotential gibt es bzgl. der geschilderten Situation?

Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:20:06 +01'00'

Richtig. Hier spielen geologische Sachverhalte insbesondere im Hinblick auf die Integrität technischer / geotechnischer Barrieren eine besondere Rolle Klüfte, Wasserangebot, Hydrogeochemie).

2.2.2 Geowissenschaftliche Prognose

Tabelle 3: Forschungsbedarf geowissenschaftliche Prognose.

Steinsalz: Genese und Sicherheitsrelevanz von kaltzeitlichen Phänomenen (Kryogene Risse, subglaziale Rinnenbildungen etc.)	X	X			
Tongestein: Entwicklung eines besseren Verständnisses glazialer Prozesse und dem damit verbundenen Einfluss auf die Entwicklung der Endlagerregion					X
Tongestein/Kristallgestein: Ausweitung der vorliegenden geowissenschaftlichen Langzeitprognosen ohne den Einfluss eines Endlagers auf ganz Deutschland					X

Die erwartete zukünftige geologische Entwicklung eines potenziellen Endlagerstandortes stellt eine wichtige Grundlage für die Abschätzung der Langzeitsicherheit dar. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose analysiert die historische Entwicklung im Umfeld eines potenziellen Endlagerstandortes und zieht hieraus Rückschlüsse auf die zukünftige Standortentwicklung (Aktualitätsprinzip). Wichtige Informationen der Langzeitprognose für die Sicherheitsbewertung der Standorte sind z. B. Aussagen zu tektonischen Entwicklungen, zum Diapirismus und zur Subrosion sowie zur Ausprägung periglazialer Einflüsse (Eismächtigkeit, Eindringtiefe Permafrost, Tiefe glazigener Rinnen).

Steinsalz:


Voraussetzung für die Durchführung einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose ist ein gutes Verständnis bezüglich der Prozesse und Entwicklungen, die während des Prognosezeitraums von 1 Mio. Jahren erwartet werden. Derartige Themenbereiche sind z. B. die zukünftige Klimaentwicklung und die Auswirkungen der resultierenden glazigenen Prozesse auf das Wirtsgestein. Für eine entsprechende Bewertung ist das Verständnis zur Entstehung von kaltzeitlichen Phänomenen wie kryogenen Rissen und subglazialen Rinnenbildungen zu vertiefen und entsprechende Modelle zu entwickeln.


Da die geowissenschaftliche Langzeitprognose Aussagen über geologische Langzeit-Entwicklungen enthält, die für die Eignungsbewertung des Standortes relevant sind, sollte sie zu einem frühen Stadium der Standorterkundung für die potenziell geeigneten Regionen durchgeführt werden.

Tongestein:

Ein wesentlicher Teil der geowissenschaftlichen Langzeitprognose umfasst die zukünftige klimatische Entwicklung. Das Verständnis vieler glazialer Prozesse ist noch recht unvollständig.



 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:21:52 +01'00'
Die Rinnenbildung ist auch für Tonstein relevant!

 Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Eingefügter Text Datum: 05.03.2019 10:23:22 +01'00'
und dann im weiteren Verfahrensverlauf regelmäßig aktualisiert und konkretisiert

Tongestein/Kristallingestein:

Geowissenschaftliche Langzeitprognosen, die im Rahmen des Projektes ANSICHT erstellt wurden, stellen ein Grundgerüst für weitere ggf. detailliertere Prognosen dar, decken aber nicht ganz Deutschland ab. Sollten im Zuge des Standortauswahlverfahrens Regionen in Betracht kommen, die außerhalb der oben genannten Prognosebereiche liegen, so ist diese Lücke zu schließen. Da die geowissenschaftlichen Langzeitprognosen ohne den Einfluss eines Endlagers erstellt werden, sollten die Langzeitprognosen generell auf ganz Deutschland ausgeweitet werden. Dies könnte im Rahmen einer Grundlagenforschung erfolgen.



2.2.3 Geologische Modelle

Tabelle 4: Forschungsbedarf geologische Modelle.

Kapitel 2.2.3 Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung	Übertägige Erkundung	Untertägige Erkundung	
Steinsalz: Entwicklung der Fluidvorkommen und Drücke im Salzstock		X			
Genese und Verheilen von Klüften im Wirtsgestein, Einfluss erhöhter Wassergehalte auf das Kriechvermögen		X			
Beeinflussung des Langzeitverhaltens von Lösungsvorkommen im Steinsalz durch die wärmeentwickelnden Abfälle, Einfluss von Spannungsänderungen auf Auflösungsprozesse		X			
Auswirkungen von THMC-Prozessen auf Scherzonen und dilatante Bereiche		X			
Relevanz von Schichtflächen und Diskontinuitäten als potenzielle hydraulische und mechanische Schwächezonen		X			
Tongestein: Weiterentwicklung des VIRTUS-Tools zur Umsetzung CAD-basierter Geometrien in solche, die zur automatischen Vernetzung für numerische Berechnungstools benötigt werden.		X			
Implementierung von Schnittstellen innerhalb von VIRTUS zu allen im Sicherheitsnachweis verwendeten Computer Codes		X			
Kristallingestein: Sichtung numerischer Ansätze zur Beschreibung geklüfteter Medien					X
Entwicklung von geologisch-numerischen Modellen, die strukturgeologische Merkmale zufriedenstellend abbilden					X



Geologische Strukturmodelle bilden die standortspezifischen geologischen Rahmenbedingungen ab und stellen eine Grundlage für die Sicherheitsbewertung eines Endlagerstandortes dar. Sie werden kontinuierlich an den wachsenden Kenntnisstand angepasst und sollen so gestaltet werden, dass sie die Basis für Nachweisberechnungen zur Integrität des Wirtsgesteins bzw. des ewG sowie Analysen zur Radionuklidmigration darstellen können.

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:28:14 +01'00'

Hier ist ggf. eher ein gestuftes Verfahren angebracht: Die Gegenstände der geowissenschaftlichen Langzeitprognose hängen auch vom jeweiligen Standort / Wirtsgestein ab, für Kristallinstandorte sind nicht notwendigerweise dieselben Phänomene relevant wie für Salz- oder Tonstandorte, dies wird auch im vorangegangenen Text bereits deutlich. Daher sollte man gestuft vorgehen: Allgemeine geowissenschaftliche Aussagen für ganz Deutschland ableiten, aber dann im Verlauf des Verfahrens regional / lokal verfeinern / detaillieren.

Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:33:00 +01'00'

Problematik Kohlenwasserstoffe separat ausweisen? (Breite von Untersuchungsthemen: Vorkommen / Genese, Detektion, THMC-Prozesse in Wechselwirkungen mit Abfällen - letztere fallen genau genommen nicht mehr unter "geologische Modelle").

Nummer: 3 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:31:08 +01'00'

Die Setzung der Kreuze ist insofern richtig, als diesbezügliche Aussagen bereits für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen benötigt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die meisten genannten Themen bis dahin nicht abschließend behandelt werden können, es wird also im Fortgang des Verfahrens zu Updates kommen müssen.

Nummer: 4 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:34:13 +01'00'

Hydrogeologische / hydrogeochemische Modellvorstellungen bereits in früheren Phasen entwickeln? Wichtig für Barrierenintegrität im kristallinen Hartgestein!

Nummer: 5 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:36:00 +01'00'

Beim Weiterlesen aufgefallen: Bezieht sich das Kapitel nur auf STRUKTUR-Modelle? Dann werden manche der obigen Kommentare obsolet bzw. gehören an andere Stelle. Aber das Wort Strukturmodell sollte dann in der Kapitelüberschrift vorkommen!

Steinsalz:

Der Entwicklungsstand für die Strukturmodelle ist sowohl für Salzstöcke wie auch für Salzkissen und flach lagernde Salze (vgl. Projekt KOSINA) weit fortgeschritten. FuE-Bedarf besteht bezüglich der Weiterentwicklung der Modelle im Hinblick auf:

- Erstellung eines dynamischen, materialwissenschaftlich belegten Modells der Entwicklung der Fluidvorkommen und Drücke im Salzstock.
- Genese und Verheilen von Klüften im Wirtsgestein (insbes. im ewG), Einfluss von erhöhten Wassergehalten auf das Kriechvermögen.
- das Langzeitverhaltens von lösungsgefüllten Hohlräumen im Steinsalz im veränderlichen Temperaturfeld und den Einfluss von Spannungsänderungen auf Auflösungsprozesse.
- die Auswirkungen von THMC-Prozessen auf die Entwicklung von Scherzonen und dilatanten Bereichen.
- die Relevanz von Schichtflächen und Diskontinuitäten als potenzielle hydraulische und mechanische Schwächezonen.

Tongestein:

Geologische Modelle bilden eine Basis für numerische Berechnungsmodelle, mit dessen Hilfe rechnerische Nachweise zu führen sind. In der Praxis ist die Berücksichtigung von geologischen Modellen mit erheblichen Schwierigkeiten und ggf. hohem manuellen Aufwand verbunden. Geologische Modelle werden in der Regel mit Hilfe CAD-basierter Tools erstellt, die eine geeignete Visualisierung des Modells erlauben. Eine direkte Umsetzung in exakt definierte Volumenkörper, die benötigt werden, um eine automatische Generierung numerischer Netze zu ermöglichen ist ein komplizierter Prozess. In dem Projekt VIRTUS wurde versucht, dieses Problem zu lösen (Wieczorek et al. 2014). Das Fraunhofer Institut in Magdeburg hat den VIRTUS Computer Code entwickelt, mit Hilfe dessen durch Ausführung automatisierter Korrekturroutinen CAD-basierte 3D-Modelle in geeignete Geometriemodelle für numerische Berechnungstools umgesetzt werden können. Durch Weiterentwicklung des VIRTUS-Tools und Implementierung von Schnittstellen zu allen im Sicherheitsnachweis verwendeten Computer Codes könnte dieses Umsetzungsproblem gelöst werden.

Kristallingestein:

Eine wesentliche Schwierigkeit bei der Modellierung kristalliner Gesteinskörper betrifft die geometrische Abbildung des komplexen dreidimensionalen Trennflächengefüges. Obwohl Störungen und Klüfte im Aufschluss in der Regel gut sichtbar sind, ist die vollständige räumliche Erfassung (deterministisch) aller Trennflächen über ein größeres Gebiet häufig nicht realisierbar. Bei der Generierung sogenannter Trennflächen-Modelle kommen daher üblicherweise stochastische Ansätze zum Einsatz. Bei diesen Ansätzen werden die geometrischen Eigenschaften der Diskontinuitäten mittels charakteristischer Verteilungsfunktionen beschrieben und mittels statistisch-stochastischer Verfahren generiert. Die ermittelten statistischen Kenngrößen oder Verteilungsfunktionen einzelner Kluftparameter (räumliche Lage, Länge, Orientierung etc.) müssen dabei repräsentativ für das Untersuchungsgebiet angenommen werden.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens CHRISTA-II () ist die Entwicklung eines für Deutschland standortunabhängigen generischen geologischen Modells für die Konfigurationstypen "multipler ewG" und "überlagernder ewG" angedacht, für dessen geologische Einheiten Referenzwerte zu den Gesteinseigenschaften (wie z. B. gesteinsmechanische Parameter) festgelegt werden. Die Herausforderung besteht in der Entwicklung eines geologischen Modells, das die strukturgeologischen Merkmale unter Berücksichtigung der zu lösenden Problemstellungen zufriedenstellend abbildet und berücksichtigt.



2.2.4 Referenzdatensatz

Tabelle 5: Forschungsbedarf Referenzdatensatz.

Kapitel 2.2.4 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für über- tägige Erkun- dung Repräsentative vorläufige Si- cherheitsunter- suchungen	Übertägige Er- kundung Weiterführende vorläufige Si- cherheitsunter- suchungen	Untertägige Er- kundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsunter- suchungen	
Steinsalz: Erweiterter Datensatz zur Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch Lösungen und Kohlenwasserstoffe		X		X	X
Erweiterter Datensatz zur Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch thermische Einwirkungen		X		X	
Steinsalz/Tongestein/Kristalline- stein: Entwicklung eines geowissenschaftlichen Informationsbedarfsprofils für die Festlegung robuster Referenzdatensätze für die Durchführung von Nachweisberechnungen		X			X


Zu Beginn des Standortauswahlverfahrens ist es aufgrund der lückenhaften Geodatenbasis erforderlich, Referenzdatensätze zu definieren, deren entsprechende Kennwerte im Rahmen von sicherheitsanalytischen Modellberechnungen verwendet werden können.




Dazu müssen die charakteristischen Gesteinseigenschaften anhand von Kennwerten oder Parametern zusammen mit ihren jeweiligen Bandbreiten, Abhängigkeiten und Unsicherheiten bestimmt werden. Dies sind in erster Linie die hydraulischen, die mechanischen, die thermischen und die chemisch-mineralogischen Eigenschaften sowie für die radiologische Langzeitaussage die Rückhalteeigenschaften. Die Charakterisierung der Eigenschaften gilt auch für Lösungen und Gase, die in den Gesteinsbereichen anzutreffen sind.

Steinsalz:

Für das Wirtsgestein Steinsalz ist insbesondere die Beeinflussung der mechanischen Gesteinseigenschaften durch Lösungen und Kohlenwasserstoffe und durch thermische Einwirkungen zu vertiefen.

 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:48:20 +01'00'

Angesichts der Formulierungen des StandAG ist zu überlegen, in wie weit das ewG-Konzept im kristallinen Hartgestein überhaupt eine Rolle spielen sollte. Das StandAG lässt beide Möglichkeiten offen (ewG oder "ein alternatives Konzept zu einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich"), die BGE muss sich im Rahmen ihrer Konzeptentwicklung entscheiden, welche(r) Weg(e) in Deutschland überhaupt aussichtsreich ist / sind. Das ist ein dringendes Thema!

 Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:42:29 +01'00'

Es ist zu ahnen, was hier gemeint ist. Für eine Veröffentlichung muss das Konzept aber ausführlicher erklärt werden!

 Nummer: 3 Verfasser: Röhlig Thema: Eingefügter Text Datum: 05.03.2019 10:42:49 +01'00'

Kenntnis zur

Alle Wirtsgesteine:

Für alle Wirtsgesteinstypen ist für die Festlegung von robusten Referenzdatensätzen für die Durchführung von Nachweisberechnungen der benötigte geowissenschaftliche Informationsbedarf zu bestimmen.

2.2.5 Erkundungsprogramm und Erkundungsmethoden

Tabelle 6: Forschungsbedarf Erkundungsprogramm und –methoden.

Kapitel 2.2.5 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für über- tägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicher- heitsuntersuchungen	Übertägige Er- kundung Weiterführende vorläufige Sicher- heitsuntersuchungen	Untertägige Er- kundung Umfassende vor- läufige Sicher- heitsuntersuchungen	
Steinsalz: Entwicklung von Referenzkonzepten für Erkundungsprogramme für steil und flach lagernde Salzformationen		X	X	X	
Verbesserung der Erfassung der Internstruktur eines Salzstocks durch Verschneidung hoch aufgelöster Seismik mit EMR-Messungen und einer mikroseismischen Analyse					X
Verbesserung der zerstörungsfreien Detektion von lösungsführenden Bereichen mittels einer kombinierten Auswertung von seismischen und EMR-Daten					X
Entwicklung von Untersuchungsmethoden zur Identifizierung von Kohlenwasserstoff-Vorkommen und zur Ermittlung der Mengen, Zusammensetzung, Genese, Herkunft, Transportmechanismen und räumlichen Verteilung					X
Tongestein/Kristallgestein: Entwicklung eines Erkundungsprogramms für die übertägige Erkundung einer Standortregion zur Deckung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs für die Standortbeschreibung und die Festlegung robuster Referenzdatensätze	X	x			
Entwicklung eines Erkundungsprogramms für die untertägige Erkundung einer Standortregion zur Deckung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs für die Standortbeschreibung und die Festlegung robuster Referenzdatensätze		x	x		
Machbarkeitsstudie zur Prüfung, inwieweit die Informationsbedürfnisse für beide Erkundungsarten von dem aktuellen Stand der Technik entsprechendes Erkundungsverfahren gedeckt werden können.					x

Die Auswahl eines Endlagerstandortes mit für die Endlagerung günstigen Wirtsgesteinseigenschaften und einem struktureologisch-tektonisch geeignetem Umfeld erfordert umfangreiche geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten. Diese Arbeiten glie-

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 15:40:47 +01'00'

Vgl. Kommentare weiter oben. Angesichts der Überschrift "Geologische modelle" hatte der Verfasser einige dieser Punkte bereits dort erwartet.

Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:52:00 +01'00'

Die Formulierung ist zumindest irreführend: Es wird von "InformationsBEDÜRFNISSEN" ausgegangen, aber sind die Vorgehensweisen bei den jeweiligen Sicherheitsuntersuchungen nicht eher durch die MÖGLICHKEITEN in der jeweiligen Phase determiniert? Und man muss in den Sicherheitsuntersuchungen das verwenden, was man in der jeweiligen Erkundungsphase hat bzw. bekommen kann? Bedürfnisorientierte Neuentwicklungen von Erkundungsmethoden werden im Standortauswahlverfahren doch eher die Ausnahme sein?

den sich in eine übertägige und eine untertägige Erkundung und dienen der Informationsgewinnung als Grundlage für Sicherheitsbetrachtungen und den später zu führenden Sicherheitsnachweis. Die Anforderungen an die Standorterkundung aus der Sicht des Standortauswahlverfahrens (insbesondere Anwendung der Suchkriterien und der zu führenden Sicherheitsuntersuchungen) gliedern sich prinzipiell in zwei Blöcke.



Im ersten Block geht es prinzipiell um die Erfüllung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs für die Standortbeschreibung. Dieser wird für die wiederholte Anwendung der vorgegebenen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in den verschiedenen Verfahrensschritten und für die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sowie des späteren Sicherheitsnachweises benötigt.

Im zweiten Block geht es um die Erfüllung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs zur Parametrisierung der im Berechnungsmodell ausgehaltenen Modelleinheiten zur Festlegung robuster Referenzdatensätze.

Steinsalz:

Für das Wirtsgestein Steinsalz ist unter Berücksichtigung der Erfahrungen bei der Erkundung von Salzstöcken ein Referenzkonzept für die Erkundung von Salzstöcken zu entwickeln. Es ist zu prüfen, in wie weit diese Vorgehensweise bei der Erkundung flach lagernder Salzformationen zu anzupassen ist. Der FuE-Bedarf bezüglich der Erkundungsmethoden für Steinsalz konzentriert sich auf die Entwicklung oder Verfeinerung geophysikalischer Messverfahren zur Bewertung sicherheitsrelevanter Eigenschaften der Salzbarriere. So ist eine Verbesserung der Erfassung der Internstruktur eines Salzstocks, z. B. durch Verschneidung hoch aufgelöster Seismik mit EMR-Messungen und einer mikroseismischen Analyse, zu untersuchen. Weiterhin soll angestrebt werden, lösungsführende Bereiche exakter, zerstörungsfrei zu detektieren. Außerdem sollen Untersuchungsmethoden zur Identifizierung, Quantifizierung und Charakterisierung von Kohlenwasserstoff-Vorkommen entwickelt werden. Eine Methode zur exakteren Detektion oder zum Nachweis von Klüften und Rissen im Wirtsgestein soll identifiziert bzw. entwickelt werden.



Tongestein/Kristallingestein:

Für die Wirtsgesteinstypen Tongestein und Kristallingestein sollte geprüft werden, ob und wenn ja, mit welchen, dem Stand der Technik entsprechenden, Erkundungsmethoden die spezifischen Anforderungen oder die Informationsbedürfnisse erfüllt werden können. Lassen sich die Anforderungen nicht in ausreichendem Maße erfüllen, so ist zu prüfen, ob durch geeignete FuE-Tätigkeiten diese Lücke bezüglich der Erkundungsverfahren geschlossen werden kann. Ist dies der Fall, wäre ein entsprechendes FuE-Projekt zu initiieren.

Kristallingestein:

Für das Wirtsgestein Kristallin kann sich der geowissenschaftliche Informationsbedarf und damit die Erkundungsziele aufgrund der bisher angedachten Sicherheitskonzepte, welche auf einer unterschiedlichen Relevanz der verschiedenen Barrieren (Behälter, geotechnische Barrieren, Wirtsgestein, Deckgebirge) basieren, erheblich unterscheiden. Beispielsweise erfordert der Typ "multipler ewG" sicherlich einen höheren geologischen



Seite: 22

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:53:41 +01'00'
Von hier an bis zur Überschrift "Steinsalz" ist das nicht sauber formuliert - s. oben.

Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:54:18 +01'00'
Anhydritschichten?

Nummer: 3 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:54:50 +01'00'
Anmerkung zu ewG s. oben.

Detailierungsgrad im Einlagerungsbereich als der Typ "überlagernder ewG", bei dem auch nicht-kristalline Deckgebirgsbereiche verstärkt zu erkunden sind. Dementsprechend sollte für jedes Sicherheitskonzept ein individuelles Erkundungsprogramm ausgearbeitet werden, das auf den unterschiedlichen geowissenschaftlichen Bedarf angepasste Erkundungsmethoden zur Folge hat. Des Weiteren ist zu erarbeiten, welcher geowissenschaftliche Informationsbedarf über übertägige und untertägige Erkundungen gedeckt werden kann. Ein wirtsgesteinsspezifisches Erkundungsprogramm, das auf die einzelnen Verfahrensschritte des Standortauswahlverfahrens ausgelegt ist und gleichzeitig den Informationsbedarf der einzelnen kristallinen Sicherheitskonzepte berücksichtigt, existiert in Deutschland nicht.

2.2.6 Integritätsnachweise geologische Barrieren

Ausgangspunkt für den Integritätsnachweis für die geologische Barriere sind die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, wie sie vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgestellt wurden (BMU 2010). Danach basiert die Sicherheit eines Endlagers für wärmeentwickelnde hoch radioaktive Abfälle darauf, einen möglichst weitgehenden, dauerhaften und nachsorgefreien Einschluss der radioaktiven Abfälle im ewG zu erreichen und zu erhalten. Die radioaktiven Stoffe verbleiben im Wesentlichen im ewG und verlassen diesen allenfalls in einer Größenordnung, die in den Sicherheitsanforderungen als gering definiert wird. Der ewG muss seine einschließende Wirkung über den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre behalten, was im Wesentlichen durch den sogenannten Integritätsnachweis zu zeigen ist. Der Nachweis der Integrität ist anhand der in den Sicherheitsanforderungen gegebenen Integritätskriterien zu führen.

2.2.6.1 Nachweisrelevante Prozesse in der geologischen Barriere

Tabelle 7: Forschungsbedarf Prozesse in der geologischen Barriere.

Kapitel 2.2.6.1	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz: Absicherung der Beobachtungen zur Migration der Fluid inclusions und Unterersetzung durch gezielte Indexversuche				X	X
Behandlung von Ungewissheiten in der Salzbarriere unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses				X	X
Absicherung der Ergebnisse zur thermochemischen Sulfatreduktion					X
Tongestein: Erweiterung der Nachweismethodik für die Integrität um chemische und biologische Prozesse					X
Abschätzung der Gasbildungsraten unter in situ-Bedingungen			X	X	
Druck- und Porendruckentwicklung unter Endlagereinfluss		X	X	X	



Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:56:15 +01'00'

Diese werden überarbeitet. Problem des "moving target" ist aber angesichts des Zeitplans des BMU überschaubar. Trotzdem wäre ein diesbzgl. Hinweis hier angebracht.

Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 10:59:56 +01'00'

Hier (und auch anderswo) erschließt sich nicht unmittelbar, warum die Kreuze genau in diese Spalten gesetzt wurden. Aus den nachfolgenden Texten sind Überlegungen zur Zeitplanung zu erahnen, sie sollten aber expliziert werden (Argumente vom Typ: "Daher ist eine Befassung in der Phase XYZ sinnvoll").

Kapitel 2.2.6.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für über- tägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicher- heitsuntersu- chungen	Übertägige Er- kundung Weiterführende vorläufige Sicher- heitsuntersu- chungen	Untertägige Er- kundung Umfassende vor- läufige Sicher- heitsuntersu- chungen	
Einfluss von Inhomogenitäten innerhalb des ewG auf die Nachweisführung				X	
Kristallingestein: Konkretisierung der im Kristallin zu berücksichtigenden nachweisrelevanten Prozesse für die drei Einlagerungskonzepte		X	X	X	X

Steinsalz:

Die integrale Salzbarriere ist nicht homogen aufgebaut, sondern enthält eine (tektonisch und auffahrungssinduzierte) Belastungshistorie, Schichtgrenzen zwischen unterschiedlichen stratigrafischen Einheiten sowie verheilte Klüfte und bereichsweise Feuchte und Kohlenwasserstoffe. Daher empfiehlt es sich, die Beobachtungen zur Migration der fluid inclusions abzusichern. Hinsichtlich der Behandlung von Ungewissheiten in der Salzbarriere sollten die Ergebnisse zum ERAM abgewartet werden und diese anschließend auf ein HAW-Endlager erweitert werden. Bezüglich der thermochemischen Sulfatreduktion sollte das Ergebnis der Literaturrecherche - möglichst experimentell - abgesichert werden.

Tongestein:

Bezüglich einer Gasbildung in einem Endlager im Tongestein sind bisher nur rudimentäre Abschätzungen erfolgt. Für den Nachweis der Integrität der geologischen Barriere ist der Druckaufbau durch Gasbildung ein zu berücksichtigender Lastfall. Eine Konkretisierung der Gasbildungsraten unter in situ-Bedingungen ist notwendig. Dies kann allerdings erst dann erfolgen, wenn neben der Konkretisierung des Behälterkonzeptes und des Metallinventars insgesamt auch Informationen über die Lösungszusammensetzung im Tongestein vorliegen. Neben dem Druckaufbau durch Gasbildung ist generell die Druck- bzw. Porendruckentwicklung als Funktion des Endlagereinflusses (thermisch, mechanisch, hydraulisch) und die damit verbundene Belastung des Tongesteins zu ermitteln. Dazu ist zunächst die Kenntnis der entsprechenden Eigenschaften der jeweils zu betrachtenden Tongesteinsformation notwendig. Darüber hinaus bleibt der Einfluss von Inhomogenitäten innerhalb des ewG auf die Nachweisführung zu prüfen.

Kristallingestein:

Für das Wirtsgestein Kristallin ist es das Ziel, unter Berücksichtigung des Sicherheits- und Endlagerkonzeptes die Prozesse und Einwirkungen zu identifizieren und abzuleiten, die die Zuverlässigkeit der Sicherheitsfunktion des Endlagersystems gegebenenfalls beeinträchtigen und im Rahmen der Nachweisführung mit Hilfe von sicherheitsanalytischen Untersuchungen rechenstechnisch zu simulieren sind. Das zu diesem Zweck benötigte umfassende Systemverständnis über die im Nachweiszeitraum im Endlagersystem ablaufenden Prozesse und Einwirkungen wird im Rahmen des aktuell laufenden FuE-Projektes CHRISTA-II mit Hilfe eines generischen FEP-Katalogs für Kristallingesteine in

Deutschland entwickelt. Diese Prozesse müssen konkretisiert und weiterentwickelt werden.

2.2.6.2 Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle)

Tabelle 8: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle).

Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz: Keine					
Tongestein: Entwicklung von Stoffmodellen für die Unterkreidetone in Norddeutschland und ggf. weiterer Tongesteine im Zuge der Standortauswahl zur Erstellung zuverlässiger Prognosen		X	X	X	
Weiterentwicklung von gekoppelten THM-Stoffmodellen inklusive Mehrphasenströmung			X	X	X
Umgang mit Modellunsicherheiten					X
Konzept zur rechen-technischen Handhabung eventueller Inhomogenitäten innerhalb des Wirtsgesteins					X
Kristallingestein: Sichtung und Prüfung von Stoffmodellen im Hinblick einer Eignung im Rahmen von Integritätsanalysen		X	X	X	X

Um die Integrität der geologischen Barriere über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre beurteilen zu können, muss ein umfangreiches Systemverständnis vorliegen. Dieses muss die hydrogeologischen Verhältnisse und petrophysikalischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und der umgebenden Einheiten zum Einlagerungszeitpunkt als auch deren zukünftige Entwicklung umfassen. Es sollte eine Modellvorstellung über die Prozesse erarbeitet werden, die zu einer Änderung der einschlussrelevanten Eigenschaften führen können, wofür rechnerische Auswertungen in Form von gekoppelten numerischen Berechnungen unumgänglich sind. Darin werden Prozesse, die traditionell in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen bearbeitet werden, in einer Berechnung zusammen behandelt. Es wird unterschieden zwischen Prozessklassen, die im Allgemeinen durch partielle Differentialgleichungssysteme dargestellt werden und Kopplungsmechanismen, die die Beeinflussung zwischen den Prozessen beschreiben. Für jede Prozessklasse und auch für die Kopplungsmechanismen müssen Stoffmodelle vorhanden sein, mit deren Hilfe der Prozessablauf im Wirtsgestein mathematisch im Rahmen von Simulationsmodellen beschrieben werden kann.

Steinsalz:

Die Fragestellung der Modellierung des Verhaltens von Steinsalz mit unterschiedlichen Stoffmodellen sowie Kontinuums- und Diskontinuumsansätzen wird mit Bezug auf die Integrität der Salzbarriere derzeit im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ERAM umfassend diskutiert und begutachtet. Aufgrund des unter Wärmentwicklung abbindenden

Versatzmaterials Salzbeton werden auch Temperaturaspekte behandelt. Deshalb besteht kein aktueller FuE-Bedarf. Am Beispiel des ERAM kann jedoch ermittelt werden, welche Kenntnisse für ein Endlager im Steinsalz tatsächlich notwendig sind, wobei der Einfluss wärmeentwickelnder Abfälle im Rahmen einer Differenzbetrachtung erfolgen kann.

Tongestein:


Im Gegensatz zum Opalinuston steht im Moment kein Stoffmodell für die Unterkreidetonen in Norddeutschland zur Verfügung, mit dem zuverlässig Prognosen möglich sind. Daher muss im Rahmen von FuE-Vorhaben an der Entwicklung von gekoppelten THM-Stoffmodellen, inklusive Mehrphasenströmung, gearbeitet und der Umgang mit Unsicherheiten geklärt werden. Standort spezifische Bedingungen sind hierbei einzubeziehen. Stehen Stoffmodelle zur Verfügung, müssen diese in numerischen Berechnungsprogrammen implementiert und verifiziert sowie validiert werden. Kommen im Zuge des Standortauswahlverfahrens weitere Tongesteinsformationen in Betracht, so gilt dafür Entsprechendes.


Für Tongesteine aus dem Jura ist noch kein allgemeingültiges mechanisches Stoffmodell verfügbar, mit dem das rheologische Langzeitverhalten (auch im weitesten Sinne als "Kriechen" bezeichnet) eindeutig abbildbar ist. An einem realen Standort ist mit Inhomogenitäten zu rechnen. Entsprechend der standort spezifischen Gegebenheiten (Skala von Homogenbereichen, Klüfte, Einschlüsse) muss ein Konzept zur rechentechnischen Handhabung entwickelt werden.

Kristallingestein:

Die mathematische Abbildung von Prozessen hängt im Kristallingestein nicht nur von der Auswahl geeigneter Stoffmodelle ab, sondern muss sich auch mit geeigneten numerischen Methoden auseinandersetzen, da die üblicherweise im Bereich der Endlagerforschung genutzten Kontinuumsmethoden sich nur eingeschränkt für die Beschreibung von geklüfteten Gesteinen eignen.

Eine universelle numerische Methode zur Lösung komplexer THM-Berechnungen ist nicht. In einem ersten Schritt ist es notwendig, die in der Literatur beschriebenen methodischen Konzepte zur Beschreibung geklüfteter Gesteinskörper zu sichten und darauf eine Modellierungsstrategie (inkl. dafür geeigneter Stoffmodelle) zur Führung entsprechender Integritätsnachweise zu erarbeiten. Dies ist aktuell Gegenstand des laufenden FuE-Projektes CHRISTA-II. Aus jetziger Sicht werden die Ergebnisse Mitte 2020 vorliegen.

 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:01:46 +01'00'
Formulierung etwas wolkig. Welche Typen von Modellen genau sind hier das Thema?

 Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:02:00 +01'00'
Unklar: Was sollte das auch für eine Methode sein?

2.2.6.3 Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise

Tabelle 9: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise.

Kapitel 2.2.6.3 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz: Keine					
Tongestein: Verbesserung der Effizienz der numerischen Berechnungsverfahren					X
Massive Parallelisierung der Berechnungscodes zur die Ausnutzung von aktuell verfügbarer Multiprozessor-Hardware und Großrechner					X
Implementierung adaptiver Gitterverfahren in aktuelle THM Berechnungscodes zur Verwendung von Integritätsanalysen und radiologischen Konsequenzanalysen					X
Kristallingestein: Anpassung und Verifikation vorhandener Rechenwerkzeuge hinsichtlich einer Nutzung im Kristallingestein zur Führung von Integritätsnachweisen					X

Mit Hilfe von numerischen Analysen soll das Systemverhalten eines Endlagers simuliert und der geforderte Integritätsnachweis erbracht werden.

Tongestein:


Die Simulation von gekoppelten, nichtlinearen Systemen auf großen Gebieten und gleichzeitig in Teilbereichen mit großem Detaillierungsgrad stellt für die numerischen Berechnungsverfahren, die Hard- und Software sowie den Modellaufbau eine große Herausforderung dar. Aufgrund der starken Kopplung einzelner Prozessklassen ist eine getrennte Modellierung der Prozesse nur in Ausnahmefällen zielführend. Es existieren zwar bereits Berechnungstools, die eine Kopplung der verschiedenen Prozessklassen beinhalten, aber ein wesentlicher limitierender Faktor ist dabei der Rechenaufwand.

Auf Grund der großen rechentechnischen Herausforderung muss die Effizienz der numerischen Verfahren weiter erhöht werden. Eine massive Parallelisierung der Berechnungscodes würde die Ausnutzung von aktuell verfügbarer Multiprozessor-Hardware verbessern. Auch eine Aufteilung verschiedener Berechnungsprozesse auf unterschiedliche Prozessoren kann die Effizienz erhöhen. Ebenso wäre der Einsatz adaptiver Gitterverfahren zu prüfen, die in Codes zur Berechnung von Integritätsanalysen und radiologischen Konsequenzanalysen zur Effizienzerhöhung implementiert werden könnten.

Kristallingestein:

Im Rahmen des aktuell laufenden Projektes CHRISTA-II wird ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle in Kristallingestein entwickelt. Kernelemente des FuE-Vorhabens sind die Nachweise zur Barrierenintegrität und die radiologische Analyse. Auf Basis plausibler standortunabhängiger generischer geologischer Modelle erfolgt eine beispielhafte Durchführung von Integritätsana-



 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:27:55 +01'00'

In wie fern und warum ist diese Aussage spezifisch für Tongestein?



lysen sowohl für die geologische als auch die geotechnischen Barrieren sowie die Berechnung radiologischer Sicherheitsindikatoren. Ziel ist daher die Anpassung und Verifikation vorhandener Rechenwerkzeuge hinsichtlich einer Nutzung im Kristallingestein zur Führung von Integritätsnachweisen für die geologische Barriere.

2.2.6.4 Sonderfall: Gasmenge, Gasbildung und Gaspfad

Tabelle 10: Forschungsbedarf Sonderfall: Gasmenge, Gasbildung und Gaspfad.


Kapitel 2.2.6.4 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz: Abbau konservativer Ansätze bei der Gasdruckentwicklung		X		X	
Verbleib der Gase im Endlager bei geringen Druckaufbauarten		X		X	
Technische Konzepte zur Beherrschung des Gasdruckes					X
Berücksichtigung des Einflusses von unter Druck stehenden Gasen im Liegenden		X	X	X	


Steinsalz zeichnet sich durch seine hohe Dichtheit (Gasdichtheit, Gaskavernen) sowie durch das Wiederverschließen von Hohlräumen durch Kriechen aus. Bei Verschluss des Endlagers ist luftgefüllter Porenraum im Versatz vorhanden. Weiterhin führen Gasbildungsprozesse (z. B. Metallkorrosion, mikrobielle Prozesse, thermochemische Sulfatreduktion) zu zusätzlichen Gasmengen. Diese nicht radioaktiven Gasmengen waren vor dem Paradigmenwechsel von der begrenzten Freisetzung zum sicheren Einschluss ohne sicherheitstechnische Bedeutung. Im Falle des sicheren Einschlusses stellt sich die Frage nach dem Verbleib der Gasmengen.

Für prototypische Sicherheitsuntersuchungen ist zunächst die Reduktion der Auslegungstemperatur gemäß StandAG auf vorsorgliche 100°C, die vermutlich zu einer Minderung der Gasdruckaufbauartefakt führt, zu untersuchen. Des Weiteren ist zu klären, wo bei geringen Druckaufbauarten das Gas verbleibt, ob sich Gaspolster bilden, ob es das Steinsalz infiltriert bzw. welche Migrationspfade bevorzugt sind.

In einem dritten Schritt sind technische Konzepte zur Beherrschung des Gasdrucks einzubeziehen, z. B. Speicherholräume. Ggf. können dabei Monitoringkonzepte zur Überwachung, die im Zusammenhang mit Rückholung und Bergung entwickelt werden (z. B. druckentlastende Beobachtungsbohrungen ausgehend von der Erkundungssohle), in die Betrachtungen einbezogen werden. Technische Konzepte sind bereits verfügbar, das Zusammenführen mit Monitoringkonzepten kann während der untertägigen Erkundung erfolgen.



 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:28:34 +01'00'
Aber entscheidend ist doch ggf. die Integrität der technischen Barrieren?

 Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:30:00 +01'00'
Heißt das, dass die BGE dauerhaft von 100°C ausgehen wird?

Die Einbeziehung von unter Druck stehenden Gasen im Liegenden ist schon für die Ausweisung von Teilgebieten relevant, da möglicherweise dieser Sachverhalt für das Abwägungskriterium Potenzialbringer von Relevanz ist und ggf. damit die Ausweisung von Teilgebieten beeinflusst.



2.3 Endlagerkonzepte

Ein Teilbereich der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist die Erstellung von Endlagerkonzepten, welche maßgeblich vom Wirtsgesteinstyp abhängen. Insbesondere sind Behälterkonzepte, Ausbausysteme zur Offenhaltung von Grubenräumen und Verfüll- und Verschlusskonzepte wirtsgesteinsabhängige Einflussgrößen mit potenziell starkem Einfluss auf den langfristig sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle. Zusätzlich sind die Einlagerungstechnologien parallel zum Standortauswahlverfahren weiter auszuarbeiten, um eine belastbare Entscheidung für die Vorzugsvariante des Einlagerungskonzepts für die jeweilige geologische Situation zu ermöglichen.

Nach heutigem Stand der Wissenschaft und Technik basieren Endlagerkonzepte auf folgenden Konzepten zur Gewährleistung des sicheren Einschlusses der Abfälle:

- Das ewG Konzept in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tongestein.
- Multiple ewG im Wirtsgestein Kristallingestein.
- Ein Konzept, das sich wesentlich auf technische Barrieren verlässt im Wirtsgestein Kristallingestein.
- Ein Konzept mit überlagerndem ewG in Form z. B. einer sedimentären Schicht im Deckgebirge im Wirtsgestein Kristallingestein.

Verschiedene geologische Formationen der Wirtsgesteinstypen und die Anwendung verschiedener Einlagerungsvarianten ergeben eine Vielzahl von möglichen Kombinationen zur Erstellung von Endlagerkonzepten. Bei der Beschreibung des FuE-Bedarfs in Bezug auf Endlagerkonzepte wird den Anforderungen an die Rückholbarkeit und Bergbarkeit der Abfälle Rechnung getragen.



2.3.1 Behälterkonzept

Tabelle 11: Forschungsbedarf Behälterkonzept.

Kapitel 2.3.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein: Ermittlung der Anforderungen an Endlagerbehälter in unterschiedlichen Einlagerungsvarianten					X KOBRA
Überprüfung der Transport- und Lagerbehälter in Hinblick auf Eignung zur Endlagerung von ausgedienten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen (hohe Temperatur)					X



Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:32:36 +01'00'

Es wäre vermutlich sinnvoll, diesen abschnitt nach vorn zu schieben, da er Auswirkungen auf das weiter vorn Gesagte hat. Und: Vor dem Enlagerkonzept kommt das Sicherheitskonzept - die 4-Punkte-Liste betrifft letztlich genau dieses Thema.

Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:34:38 +01'00'

Besser: "Möglichkeit einer Bergung". Das ist die Formulierung des StandAG, die auch den im Vergleich zur Rückholbarkeit deutlich geringeren planerischen Ansprüchen Rechnung trägt.

Nummer: 3 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:36:16 +01'00'

Hier wird ein allgemeines Problem der Darstellung besonders deutlich: Welche zeitlichen Implikationen hat die Einordnung als "Grundlagenforschung"? Letztlich braucht man bereits für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen diesbzgl. Aussagen.

Kapitel 2.3.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilge- bieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsen- tative vorläu- fige Sicher- heitsuntersu- chungen	Übertägige Erkundung Weiterfüh- rende vor- läufige Si- cherheitsun- tersuchun- gen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsun- tersuchun- gen	
(Weiter-)Entwicklung und Eignungsnachweis von Behälterkonzepten für die Streckenlagerung von ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren		X	X	X	X
(Weiter-)Entwicklung und Eignungsnachweis von Behälterkonzepten für die Streckenlagerung von ausgedienten Brennelementen aus Versuchs-, Forschungs- und Prototypreaktoren		X	X	X	X
(Weiter-)Entwicklung und Eignungsnachweis von Behälterkonzepten für die Streckenlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen bis zur Genehmigungsreife		X	X	X	X
(Weiter-)Entwicklung und Eignungsnachweis von Behälterkonzepten für die vertikale Bohrlochlagerung bis zur Genehmigungsreife. Für Kristallgestein insbesondere in Hinblick auf die Behälterintegrität im Nachweiszeitraum (Korrosion, mech. Beanspruchung etc.)		X	X	X	X
(Weiter-)Entwicklung und Eignungsnachweis von Behälterkonzepten für die horizontale Bohrlochlagerung bis zur Genehmigungsreife (nur Steinsalz/Tongestein)		X	X	X	X
Entwicklung von Behälterkonzepten für die Endlagerung von weiteren schwach- und mittelradioaktiven Abfällen bis zur Genehmigungsreife (für Abfälle aus dem Endlagerbetrieb)					X

Für jede zu untersuchende Einlagerungsvariante müssen geeignete Behälterkonzepte in einer ausreichenden Planungstiefe für den anstehenden Verfahrensschritt vorliegen, um die Erstellung des Endlagerkonzepts zu ermöglichen. Bestehende Konzepte müssen zunächst dahingehend geprüft werden, ob ihre Eigenschaften den Anforderungen der Endlagerung (und Rückholung sowie Bergung) genügen können, welches für alle Wirtsgesteinstypen separat untersucht werden soll. Im Wesentlichen sind dies die Handhabbarkeit und die Abschirmung der ionisierenden Strahlung im Betrieb, die Gewährleistung der Unterkritikalität der Abfälle und ausgedienten Brennelemente (auch in der Nachverschlussphase) sowie die Bergbarkeit. Dies gilt insbesondere für Transport- und Lagerbehälter (TLB), da die Feststellung einer Unvereinbarkeit der Eigenschaften der TLB mit den Anforderungen der Endlagerung schon sehr früh zu einem Ausschluss dieser Einlagerungsvariante im Verfahren führen könnte. Im Zuge des fortschreitenden Standortauswahlverfahrens können und müssen die Konzepte und Eignungsnachweise aller Behälterkonzepte präzisiert bzw. erstellt werden, bis schließlich eine genehmigungsreife Planung vorliegt.

Im **Steinsalz** sind bei der Entwicklung von Endlagerbehältern insbesondere Fragen offen in Bezug auf die Korrosion der Behälter durch Kohlenwasserstoffe, durch Restfeuchte der Abfallgebinde und des Versatzes und auf die Gasbildung der Endlagerbehälter. Im **Tongestein** stellt insbesondere die Empfindlichkeit gegenüber hohen Temperaturen eine Herausforderung dar. Je nach Sicherheitskonzept übernehmen die Endlagerbehälter im **Kristallgestein** auch eine Einschlussfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum.

Seite: 30

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:45:02 +01'00'
Warum? Was ist mit KBS-3H? Oder wird das zu "Streckenlagerung" gezählt?

Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:46:16 +01'00'
Wie will man bzgl. des Themas "zusätzliche Endlagerung größerer Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle" vorgehen?

Nummer: 3 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 11:44:22 +01'00'
Die häufige Verwendung des Wortes "alle" bzw. "aller" weckt Besorgnisse bzgl. einer möglichen Überforderung: Macht es Sinn, zeitnah auch über den FRÜHZEITIGEN Ausschluss bestimmter Konzepte (bzw. einer Strategie oder Kriterien dazu) nachzudenken?

Nummer: 4 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 12:12:00 +01'00'
Eine zentrale Herausforderung, die hier in der Darstellung etwas versteckt daher kommt.


Behälterkonzepte für die Endlagerung von weiteren Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgehende Brennelemente ebenfalls endgelagert werden sollen, müssen von Grund auf erarbeitet werden.



2.3.2 Endlagerauslegung und Design

Table 12: Forschungsbedarf Endlagerauslegung und Design.

Kapitel 2.3.2 Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz: Ermittlung von Auslegungstemperatur und Auslegungspunkt für verschiedene Einlagerungsvarianten: die Streckenlagerung die Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkockillen horizontale Bohrlochlagerung		X			X
Modellierung von Wärmestrahlung und Konvektion in einem unverfüllten Bohrloch (horizontale Bohrlochlagerung)					X
Entwicklung von repräsentativen Endlagerdesigns für generische geologische Formationen: einen Salzstock Salz in flacher Lagerung ein Salzkissen		X			X RESUS
Tongestein: Ermittlung von Auslegungstemperatur und Auslegungspunkt für verschiedene Einlagerungsvarianten: die Streckenlagerung vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkockillen horizontale Bohrlochlagerung		X			X
Prüfung der Machbarkeit/Ermittlung einer Auslegungstemperatur und eines Auslegungspunkts für die Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern unter Berücksichtigung der Rückholungsanforderung	X				X
Modellierung von Wärmestrahlung und Konvektion in einem unverfüllten Bohrloch (horizontale Bohrlochlagerung)					X
Entwicklung eines repräsentativen Endlagerdesigns für eine generische Tonformation mit geringer Mächtigkeit mit höherer Mächtigkeit		X			X RESUS
Kristallingestein: Ermittlung von Auslegungstemperatur und Auslegungspunkt für verschiedene Einlagerungsvarianten: die Streckenlagerung vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkockillen		X			X
Entwicklung von repräsentativen Endlagerdesigns für generische Kristallinformationen: multipler ewG überlagernder ewG kein ewG (im Wesentlichen technische Barrieren)		X			X RESUS
Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein: Entwicklung detaillierter Endlagerdesigns für die Standorte der übertägigen Erkundung			X		
Weiterentwicklung und Anpassung der Endlagerdesigns für die Standorte, die auch untertägig erkundet werden				X	

 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 12:17:32 +01'00'

s. Anmerkung oben - fehlt in der Tabelle. Andererseits: Wie weit muss man diesbezüglich über die Konrad-Konzepte tatsächlich hinausgehen?

Kapitel 2.3.2 Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Implementierung der Rückholungskonzepte in die Endlagerauslegung					X

Ein Bestandteil der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind die Endlagerauslegung und das resultierende Endlagerdesign. Diese umfassen insbesondere die thermische Auslegung des Endlagers, um die Verteilung der Abfallgebinde im Wirtsgestein zu bestimmen, sowie die Planungen zum Grubengebäude. Bei diesen Arbeiten wird ein Sicherheitskonzept umgesetzt, um den sicheren Endlagerbetrieb und Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten; d. h. es werden Festlegungen getroffen, die maßgeblich am sicheren Einschluss mitwirken. Im Zuge des Fortschritts des Standortauswahlverfahrens müssen die Endlagerkonzepte an die jeweilige, aktualisierte geologische Datenbasis angepasst werden. Die Konkretisierung der geologischen Situation erfordert eine Detaillierung der Endlagerauslegung und -planung, da nur so verlässliche Ergebnisse durch die vorläufige Sicherheitsuntersuchung für das gesamte Endlagersystem gewonnen werden können.


Für jedes zu betrachtende Endlagersystem müssen deswegen alle Schritte zur Planung eines Grubengebäudes durchgeführt werden, in dem alle Abfallgebinde endgelagert werden können. Die Detaillierung von Endlagerauslegung und Design sollte mit der Präzisierung von Standortinformationen Schritt halten.

Die Entwicklung von Endlagerkonzepten sollte iterativ in jeder Etappe der Standortsuche vorangetrieben werden, damit der Detaillierungsgrad der Endlagerkonzepte mit der Präzisierung der geologischen Informationen Schritt hält. Dazu gehören auch ganz wesentlich die Endlagerauslegung und das Endlagerdesign. Nur so sind aus den Untersuchungen zum gesamten Endlagersystem verlässliche Informationen zu gewinnen. Das Endlagerdesign ist kein Teil der Forschung und Entwicklung, sondern stellt eine technische Planungsaufgabe dar. Es wird wesentlich von der Endlagertechnik (siehe dazu Kapitel 2.3.3) beeinflusst.

Steinsalz und Tongestein:

Der wesentliche FuE-Bedarf bei Steinsalz und Tongestein besteht in der Endlagerauslegung. Je nach Endlagersystem sind eine Auslegungstemperatur und ein Auslegungspunkt zu definieren. Dafür müssen die Einwirkungen der Auslegungstemperatur auf die vorgesehenen Barrieren und das Wirtsgestein weiter untersucht werden. Gleichzeitig muss die Auslegungstemperatur der Rückholungsanforderung Rechnung tragen und den Nachweis der Machbarkeit einer Rückholung erlauben. Diese Überlegungen finden Eingang in das Sicherheitskonzept, müssen aber unter starker Berücksichtigung der technischen Endlagerplanung erfolgen, weshalb sie hier aufgeführt werden.



 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 12:18:03 +01'00'

Was ist damit gemeint? Der Punkt, an dem die Auslegungstemperatur anzugeben ist?

Für ein Endlagerkonzept mit verrohrten horizontalen Bohrlöchern wie in Bollingerfehr et al. (2018), in dem die Bohrlöcher nicht verfüllt werden, muss eine Methodik zur Modellierung von Wärmestrahlung und Konvektion im Bohrloch entwickelt werden. Versuche können dabei helfen, das Modell zu validieren.

Kristallingestein:

Der wesentliche FuE-Bedarf bei Kristallingestein besteht darin, je nach Endlagersystem eine Auslegungstemperatur und einen Auslegungspunkt zu definieren. Dafür müssen die Einwirkungen der Auslegungstemperatur auf die vorgesehenen Barrieren und das Wirtsgestein weiter untersucht werden. Gleichzeitig muss die Auslegungstemperatur der Rückholungsanforderung Rechnung tragen und den Nachweis der Machbarkeit einer Rückholung erlauben. Diese Überlegungen finden Eingang in das Sicherheitskonzept, müssen aber unter starker Berücksichtigung der technischen Überlegungen der Endlagerkonzeptplanung erfolgen, weshalb sie hier aufgeführt werden. Im Kristallin sind zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen Barrieren und Endlagerbehälter im multiplen ewG und im modifizierten KBS-3 Konzept zu untersuchen. Diese weiterzuentwickelnden Einlagerungskonzepte müssen FuE aus vielen verschiedenen Bereichen zusammenführen und dann in einem Endlagerdesign münden, mit dem die Langzeitsicherheit nachgewiesen werden kann.



2.3.3 Endlagertechnik

Tabelle 13: Forschungsbedarf Endlagertechnik.

Kapitel 2.3.3 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagenforschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein: Weiterentwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern für verschiedene Einlagerungsvarianten: die Streckenlagerung die Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkockillen horizontale Bohrlochlagerung (nur Steinsalz und Tongestein)		X	X	X	X
Beobachtung und ggf. Weiterentwicklung des Stands der Bergbautechnik für Errichtung, Erhalt und Betrieb des Endlagerbergwerks					X
Entwicklung von Technik zum anforderungsgerechten Einbau von Verschlussbauwerken und Verfüllmaterial					X
Weiterentwicklung der Schachtfördertechnik im Hinblick auf die sicherheitstechnische Auslegung einer Schachtförderanlage zum Transport von Endlagerbehältern, insbesondere zur Vermeidung eines Absturzes von Abfallgebänden in den Schacht und zur Reduktion der Auswirkungen eines solchen Ereignisses					X
Weiterentwicklung der Rampentransporttechnik im Hinblick auf die sicherheitstechnische Auslegung einer Schrägförderanlage zum Transport von Endlagerbehältern					X



Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 12:24:23 +01'00'

Ist das wirklich die Hauptaufgabe? kann man hier nicht von schwedisch-finnischen Arbeiten profitieren? Und: Im schwedischen Endlagerdesign spielen Adaption an Kluffstrukturen und auch Flexibilität bzgl. des unter Tage Vorgefundenen (Benennung von Reservebereichen, flexibles Setzen von Einlagerungsbohrungen) eine große Rolle, das fehlt hier gänzlich.

Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 12:25:02 +01'00'

Schacht oder Rampe: Frühzeitige Weichenstellung?

Kapitel 2.3.3 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Tongestein: Entwicklung eines Ausbausystems, das Anforderungen aus der Langzeitsicherheit berücksichtigt					X AGENT
Kristallingestein: Entwicklung eines Ausbausystems, das Anforderungen aus der Langzeitsicherheit berücksichtigt					X AGENT

Der Begriff Endlagertechnik umfasst alle technischen Einrichtungen eines Endlagers. Für den überwiegenden Teil der Endlagertechnik ist demnach kein FuE-Bedarf von Nöten, da auf den Stand der Technik im Bergbau zurückgegriffen werden kann.


Neu und weiter zu entwickelnde Endlagertechnik sollte spätestens im Sinne einer vollständigen Genehmigungsreife bei der Genehmigungsplanung für ein Endlager an einem konkreten Standort zur Verfügung stehen. Aber auch schon bei der Erstellung von Endlagerkonzepten ist die Endlagertechnik eine wesentliche Einflussgröße auf das Endlagerdesign, da die Geometrien der Grubenräume u. a. anhand der in ihnen verwendeten Technik und deren Platzbedarf geplant werden. Auch für betriebliche Planungen und Untersuchungen zur Betriebssicherheit sind Kenntnisse zur Transport- und Einlagerungstechnik unabdingbar. Nach dem Betrieb im Endlager verbleibende technische Einrichtungen können weiterhin einen Einfluss auf die Langzeitsicherheit haben.

Grundsätzlich ist es sinnvoll, bei eher generischen Endlagerkonzepten die Entwicklung mehrerer Varianten der Transport- und insbesondere Einlagerungstechnik zu verfolgen, um nicht in Gefahr zu geraten, die Einlagerungsvariante mit der bestmöglichen Sicherheit im jeweiligen Endlagersystem voreilig auszuschließen. Nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik kommen, je nach Endlagersystem, Streckenlagerung, vertikale Bohrlochlagerung, horizontale Bohrlochlagerung (nur für Steinsalz und Tongestein) und die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern in Frage. Zusätzlich ist die Transporttechnik unter wie über Tage und in den Tageszugängen zu untersuchen. Dies gilt ebenso für jegliche Form der Umladung zwischen den verschiedenen Transportschritten (z. B. zwischen Schachttransport und Streckentransport). Weiterhin besteht detaillierter FuE-Bedarf in Bezug auf im Endlager verbleibende Komponenten und ihre Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit.

Alle Wirtsgesteine:

Für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zur Eingrenzung von Standortregionen sollten mindestens Konzeptstudien durchgeführt werden mit klarer Beurteilung der Maschinen- und Betriebssicherheit. Diese können dann in jedem Verfahrensschritt iterativ an neue/andere Randbedingungen angepasst und weiterentwickelt werden, sodass bei der Standortauswahl bei jedem Verfahrensschritt eine technische Idee zur Umsetzung



 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 12:26:36 +01'00'
Wieso? KBS-3H? (vgl. Anmerkung oben). UND: genau genommen müsste man noch nach Konzepten mit und ohne Supercontainer unterscheiden.

 Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Eingefügter Text Datum: 05.03.2019 12:26:58 +01'00'
(Strecken-)

der Endlagerung vorliegt. Werden im Standortauswahlverfahren auch Einlagerungsvarianten verworfen, entfällt auch die Notwendigkeit für weitere FuE zur entsprechenden Endlagertechnik.

Die Transport- und Einlagerungstechnik hängt wesentlich von der Art der Endlagerbehälter ab und ist damit sowohl spezifisch für das Wirtsgestein als auch für die Einlagerungsvariante zu entwickeln; mindestens ist eine Übertragbarkeit aus einem anderen Endlagerkonzept (u. U. in einem anderen Wirtsgestein) zu prüfen.

Tongestein:

Für Tongestein ist das notwendige Ausbausystem zum sicheren Bau und Betrieb des Endlagers wesentlich. Zu erwarten sind Baustoffmengen (v. a. Stahl und Beton), die einen maßgeblichen Einfluss auf das Langzeitverhalten des Endlagersystems haben können. Dies muss bei der Planung des Ausbausystems berücksichtigt werden.

Kristallingestein:

Für Kristallingestein ist das notwendige Ausbausystem zur Sicherung der Grubenräume im Bau und Betrieb des Endlagers wesentlich. Zu erwarten sind Baustoffmengen (v. a. Stahl und Beton), die einen Einfluss auf das Langzeitverhalten des Endlagersystems haben können. Gerade in den Einlagerungsbereichen sind deshalb grundsätzlich wenig geklüftete, standfeste Gebirgsbereiche mit geringer Ausbaunotwendigkeit zu bevorzugen.



2.3.4 Tagesanlagen

Table 14: Forschungsbedarf Tagesanlagen

Kapitel 2.3.4 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein: Entwicklung von Tagesanlagen für den Betrieb des Endlagers		X			X
Entwicklung von Tagesanlagen für eine mögliche Rückholung		X			X

Das übertägige Endlager- bzw. Bergwerksgelände wird als Tagesanlagen bezeichnet. Innerhalb der Tagesanlagen müssen alle Funktionen zur Versorgung und dem Betrieb des Endlagers bereitgestellt werden. Für die konventionellen, bergtechnischen Arbeiten umfasst dies unter anderem die Energieversorgung, Treibstoff- und Materiallager, Förderanlagen und Zugänge zum Endlager, Kauen und Servicegebäude, Gebäude zur Bewetterung und ggf. Kühlung des Endlagers sowie Einrichtungen zum Haufwerktransport und -lagerung und zur Aufbereitung von Verfüll- und Verschlussmaterial. Für den Umgang mit den Behältern sind Einrichtungen für die Annahme und Anlieferung der Behälter, Pufferlager für die Behälter sowie eine Trocknungsanlage nötig. Ggf. ist auf oder

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 12:41:32 +01'00'

Es fällt auf, dass hier Demonstrationsversuche nicht explizit benannt werden, obwohl diese Planungs-, Zeit- und Kostenintensiv sind und, zumindest sofern sie untertägig durchgeführt werden, auch Bedeutung für die Wahrnehmung in der interessierten Öffentlichkeit haben (Verdacht auf Vorfestlegung von Standorten). Hier sollte entscheidend nachgebessert werden.

angrenzend zu den Tagesanlagen auch eine Konditionierungsanlage und/oder ein zentrales Zwischenlager zu errichten.

Die Planung der Tagesanlagen ist ein wesentlicher Bestandteil der Endlagerkonzeptplanung. Sie ist notwendig zur Ermittlung von Endlagerstandorten, insbesondere dem Standort der Tagesanlagen. Neben der technischen Planung sind auch sozio-technische Fragen zu berücksichtigen, da die Tagesanlagen den einzig sichtbaren Teil des Endlagers darstellen. Ebenso muss die Rückholungsanforderung berücksichtigt werden. Eine solche Berücksichtigung hat bislang für die Tagesanlagen noch nicht stattgefunden.

2.3.5 Verfüll- und Verschlusskonzept

Table 15: Forschungsbedarf Verfüll- und Verschlusskonzept.

Kapitel 2.3.5 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz: Entwicklung eines technischen Verfahrens zur gleichmäßigen Befeuchtung von Salzgrus (Konzept, Technikum, großtechnische Umsetzung)					X
Zusetzen des Porenraums von Porenspeichern					X
Verhalten der Auflockerungszonen im Salz bei geringen Teufen (Sammlung von Informationen und Konzept, standortspezifische Anpassung)				X	
Abdichtbauwerke (Untersuchungen zum Gaspfad)					X
Erstellung eines Baukastens von Funktionselementen als Module zur Anpassung von Verschlussystemen an unterschiedliche Standortsituationen.					X
Tongestein: Vollständige Ableitung von Sicherheitsfunktionen, Leistungszielen und Konstruktionsanforderungen für alle Komponenten des Barrierensystems unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungskonzepte und Standortbedingungen.			X ANSICHT-II	X	
Entwicklung einer Bemessungsmethodik zur Anwendung des Advektions-Kriteriums (Dichtheit des Gesamtsystems im Zusammenspiel) unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungskonzepte und Standortbedingungen.			X ANSICHT-II	X	
Kristallingestein: Weiterentwicklung von Verfüll- und Verschlusskonzepten für alle drei zu betrachtenden Einlagerungsoptionen im Kristallin		X CHRISTA-II			
Vollständige Ableitung von Sicherheitsfunktionen, Leistungszielen und Konstruktionsanforderungen für alle Komponenten des Barrierensystems für alle drei Einlagerungsoptionen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungskonzepte und Standortbedingungen.			X CHRISTA-II	X	
Entwicklung einer Bemessungsmethodik zur Anwendung des Advektions-Kriterium (Dichtheit des Gesamtsystems im Zusammenspiel) unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungskonzepte und Standortbedingungen.			X CHRISTA-II	X	



Grundlegende Elemente eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes bestehen aus der allgemeinen Sicherheitsstrategie, die auf nationalen Regularien (Sicherheitsanforderungen) und internationalen Richtlinien aufbaut, der geologischen Standortbeschreibung,

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 12:34:25 +01'00'

Die Formulierungen (Sicherheitsfunktionen) weisen darauf hin, dass es zunächst um die Ableitung von Sicherheitskonzepten gehen muss, das diesbzgl. Kapitel kommt also zu spät!

sowohl was den Istzustand als auch die weitere Entwicklung betrifft, dem Endlagerstandortmodell inklusive der zugehörigen geowissenschaftlichen Datenbasis sowie einem Endlagerkonzept und dem damit verknüpften Verfüll- und Verschlusskonzept, welches speziell im Zusammenhang mit den Integritätsnachweis zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) eine tragende Rolle einnimmt. Selbst der bestmögliche Standort kann mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich nur dann ein sicheres Endlager beherbergen, wenn es gelingt, die notwendigen Durchörterungen des ewG nach Abschluss der Einlagerung sachgerecht zu verschließen.

Steinsalz:

Die Verfüll- und Verschlusskonzepte zu Endlagerkonzepten im Steinsalz sind bereits weit fortgeschritten. Forschungsbedarf resultiert im Wesentlichen aus dem Paradigmenwechsel von der begrenzten Freisetzung zum sicheren Einschluss, der eine Erweiterung der Anforderungen an die Verfüll- und Verschlusskonzepte zur Folge hat und damit das Erfordernis ergänzender, grundlegender Untersuchungen begründet.

Im Hinblick auf die Einbringtechnologie betrifft der FuE-Bedarf die Entwicklung eines qualifizierten technischen Verfahrens zur gleichmäßigen Anfeuchtung (< 1 Massen%) von Salzgrusversatz. Hier sollte auch der Aspekt einer Beimengung eines Feuchtetragers in Erwägung gezogen werden. Diese FuE-Ergebnisse sind für repräsentative, vorläufige Sicherheitsuntersuchungen erforderlich, um den ewG räumlich und zeitlich benennen zu können. Weiterhin entscheidet die technische Realisierbarkeit darüber, ob und unter welchen Bedingungen das Konzept angefeuchteter Salzgrus weiterverfolgt werden kann. Die Umsetzung der vorgegebenen Eigenschaften für den Versatz in überprüfbare Kenngrößen für die Qualitätssicherung während des Einbaus kann im Zusammenhang mit der Vorbereitung des großtechnischen Einsatzes bearbeitet werden. Weiterer experimenteller FuE-Bedarf insbesondere für Salzgrus bei kleinen Porositäten ist in (Wieczorek et al. 2017) beschrieben. Ein FuE-Vorhaben (KOMPASS) wurde dazu gerade bewilligt. Dessen Ergebnisse sollten abgewartet werden, deshalb erfolgt hier keine Spezifikation von FuE-Bedarf zu Salzgrus bei kleinen Porositäten ($< 2\%$).

Für bestimmte Anwendungsfälle werden Schotter und Splitt zur Bildung definierter Fließwege für Lösungen sowie als Gas- und Lösungsspeicher vorgesehen. Hierbei tritt die Frage auf, ob der Porenraum des Porenspeichers durch feuchtes und damit sehr kriechfähiges Salz, Quellsalze (z. B. Kieserit) oder Ausfällungen zugesetzt wird und wenn erforderlich, welche Maßnahmen dagegen ergriffen werden können. Diese Fragestellung zielt auf spezielle Anwendungsfälle und kann nur unter standortspezifischer Kenntnis beantwortet werden und wird daher zurückgestellt.

Für Auflockerungszonen in großen Teufen (ab ~ 500 m) besteht derzeit kein FuE-Bedarf. Bzgl. des Umgangs mit Auflockerungszonen in geringen Teufen besteht Untersuchungsbedarf, da die Deckgebirgsdichtung am Salzspiegel eines Endlagers im Salinar möglicherweise in geringen Teufen angeordnet werden muss, auch wenn der ewG deutlich tiefer liegt. Dieser Sachverhalt beeinflusst die Wahl von Funktionselementen des geotechnischen Barrierensystems. Diese FuE-Ergebnisse sind für repräsentative, vorläufige Sicherheitsuntersuchungen erforderlich, um den ewG räumlich und zeitlich benennen zu können.

Machbarkeit bezüglich der lokalen sukzessiven Entfernung des Ausbaus nach vielen Jahren zur Errichtung gebirgsverbundener Dichtelemente an gleicher Stelle zu prüfen.

Darüber hinaus sollten die vorliegenden Verfüll- und Verschlusskonzepte dahingehend weiterentwickelt werden, dass eine vollständige Auflistung hinsichtlich der Sicherheitsfunktionen, der Leistungsziele und der Konstruktionsanforderungen für jede einzelne Barrierekomponente erfolgt.

Kristallingestein:

Ziel ist es, Verfüll- und Verschlusskonzepte zu erarbeiten, die an die verschiedenen Einlagerungsoptionen im Kristallin (Bertrams et al. 2017) und den damit verbundenen unterschiedlichen ewG-Optionen angepasst sind. Diese Verfüll- und Verschlusskonzepte sollen dann als Grundlage dienen, um zu identifizieren, unter welchen Bedingungen das geotechnische Barrierensystem seine Sicherheitsfunktionen erfüllt. Die Dichtheit des Barrierensystems innerhalb des ewG soll über den Nachweiszeitraum gezeigt werden. Dazu ist es notwendig, die Eigenschaften aller Komponenten des Barrierensystems belastbar zu definieren.

Dies gilt prinzipiell auch für die Einlagerungsoption ohne einen ewG, in dem der sichere Einschluss ausschließlich durch die technische Barriere Behälter und den ihn umgebenden Buffer gewährleistet werden soll. Dieses Konzept wird auch als ewB-Konzept bezeichnet (einschlusswirksamer Bereich).



2.3.6 Rückholungs- und Bergungsaspekte

Table 16: Forschungsbedarf Rückholungs- und Bergungsaspekte.

Kapitel 2.3.6 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsen- tative vorläu- fige Sicher- heitsuntersu- chungen	Übertägige Erkundung Weiterfüh- rende vorläu- fige Sicher- heitsuntersu- chungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsun- tersuchun- gen	
Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein: Entwicklung von Rückholungskonzepten für alle betrachteten Einlagerungsvarianten und Wirtsgesteine					X
Entwicklung Rückholungstechnik					X
Nachweis der technischen Machbarkeit				X	

Während der Erkundung, Planung, Genehmigung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen soll der Planungsgrundsatz der Reversibilität von Entscheidungen die Möglichkeit geben, auf veränderte Bedingungen oder Entwicklungen zu reagieren und getroffene Entscheidungen korrigieren zu können. Während der Betriebszeit des Endlagers wird die Reversibilität von Entscheidungen durch eine Rückholbarkeit der Abfälle gewährleistet. Die Anforderung der Rückholbarkeit ist in gleicher Definition als Auslegungsanforderung an das Endlager in den Sicherheitsanforderungen verankert und ist damit Genehmigungsvoraussetzung für ein Endlager. Zur Einhaltung der Genehmigungsvoraussetzung muss eine Rückholbarkeit in das End-

Auch für dieses Kapitel gilt die Anmerkung zu Demonstrationsversuchen.

lagerkonzept integriert werden. Dafür ist es notwendig, ein geeignetes Rückholungskonzept zu entwickeln, welches die Grundlage für die Implementierung der Rückholbarkeit in die Endlagerauslegung bildet.

Die technische Machbarkeit der Rückholung wurde für die verschiedenen Wirtsgesteinstypen bislang noch nicht abschließend nachgewiesen und noch nicht für alle Einlagerungskonzepte betrachtet. Der Nachweis der Machbarkeit der Rückholung ist nach heutigem Stand Genehmigungsveraussetzung. FuE in diesem Bereich sollte grundsätzlich mit FuE zu den Endlagerbehältern, zu Endlagerauslegung und -design, zur Endlagertechnik und zu den Tagesanlagen verzahnt sein und mit vergleichbarem Detaillierungsgrad vorangetrieben werden.

Über die Betriebszeit hinaus soll eine Reversibilität durch eine Bergbarkeit der Behälter für einen Zeitraum von 500 Jahren erreicht werden. Die Anforderungen zur Bergbarkeit beziehen sich insbesondere auf die Endlagerbehälter.

2.3.7 Monitoring

Tabelle 17: Forschungsbedarf Monitoring.

Kapitel 2.3.7 Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teil- gebieten	Ermittlung von SR für übertägige Er- kundung Repräsen- tative vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Übertägige Er- kundung Weiterführende vorläufige Si- cherheitsun- tersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsun- tersuchungen	
Steinsalz: Entwicklung genereller Konzepte für ein Endlager-Monitoring eines Endlagers in einer Salzformation basierend auf existierenden Endlagerkonzepten für die drei zu betrachtenden Optionen: steile Lagerung, Salzkissen und flache Lagerung				X	
Entwicklung eines ggf. modular aufgebauten Systemkonzeptes für die übertägige Umgebungsüberwachung, das an unterschiedliche Standortbedingungen angepasst werden kann					X
Strategie- und Konzeptentwicklung für die Einbindung von Interessensgruppen in die Entwicklung von Monitoring-Programmen für ein Endlager-Monitoring				X	
Tongestein: Weiterentwicklung des generellen Konzeptes für ein Endlager-Monitoring eines Endlagers in einer Tonformation basierend auf existierenden Endlagerkonzepten, speziell im Hinblick auf den radiologischen Nachweis für die Optionen vertikale Bohrlochlagerung (optional horizontal) und Streckenlagerung				X	X MODERN
Entwicklung eines ggf. modular aufgebauten Systemkonzeptes für die übertägige Umgebungsüberwachung, das an unterschiedliche Standortbedingungen angepasst werden kann					X
Strategie- und Konzeptentwicklung für die Einbindung von Interessensgruppen in die Entwicklung von Monitoring-Programmen				X	
Kristallgestein: Entwicklung genereller Konzepte für ein Endlager-Monitoring eines Endlagers in einer Kristallinformation basierend auf existierenden Endlagerkonzepten für die drei zu betrachtenden Einlagerungsoptionen multipler ewG, überlagernder ewG und modifiziertes KBS-3-Konzept				X	

Kapitel 2.3.7 Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teil- gebieten	Ermittlung von SR für übertägige Er- kundung Repräsen- tative vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Übertägige Er- kundung Weiterführende vorläufige Si- cherheitsunter- suchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsun- tersuchungen	
Entwicklung eines ggf. modular aufgebauten Systemkonzeptes für die übertägige Umgebungsüberwachung, das an unterschiedliche Standortbedingungen angepasst werden kann					X
Strategie- und Konzeptentwicklung für die Einbindung von Interessensgruppen in die Entwicklung von Monitoring-Programmen für ein Endlager-Monitoring				X	

Das Monitoring eines Endlagers spielt eine wichtige Rolle von der Entwicklung bis zur Umsetzung von Endlagerprogrammen in tiefen geologischen Formationen, denn es liefert nützliche Informationen für einen sicheren Betrieb in den verschiedenen Phasen einer Endlagerentwicklung sowie für die Verifizierung der im Vorfeld durchgeführten Langzeitsicherheitsanalyse. Ferner stellen Monitoring-Ergebnisse eine Unterstützung für die Entscheidungen dar, die in allen Phasen eines Endlagerprogramms zu fällen sind.

Speziell weist die Endlagerkommission darauf hin, dass zu Beginn der Betriebsphase die Option bedacht werden sollte, zunächst mit einer "heißen" Test-Phase den Einlagerungsbetrieb zu beginnen, in dem lediglich einige Einlagerungsbohrlöcher oder eine einzelne Einlagerungsstrecke mit Abfallbehältern befüllt und die entsprechenden Strecken versetzt werden. Während einer solchen Test-Phase könnte die Entwicklung im Nahfeld der eingelagerten Abfälle mit geeigneten Monitoring-Systemen beobachtet werden. Auf Basis der Monitoring-Ergebnisse kann dann diskutiert und entschieden werden, ob mit dem Einlagerungsbetrieb in gleicher Form fortgefahren werden soll oder ob Anpassungen sinnvoll und notwendig erscheinen. Dies kann auch eine Entscheidung zur Rückholung aus den Testbohrlöchern oder Teststrecken beinhalten. Mit Blick auf die Nachverschlussphase sollte eine abschließende Prüfung des Monitoring-Konzeptes erfolgen vor dem Hintergrund des Standes von Wissenschaft und Technik. Dies sollte im Zusammenhang mit einer finalen Bewertung der Zielsetzungen für ein Monitoring in der Nachverschlussphase erfolgen.

Ziel ist es, zunächst eine Monitoring-Strategie zu entwickeln, die die oben genannten Punkte in geeigneter Weise abbildet. Darauf basierend wären dann Monitoring-Konzepte für Endlager in den entsprechenden Wirtsgesteinsformationen in Deutschland zu entwickeln, die diese Strategie umsetzen. Kernpunkt einer Strategie sollte sein, in transparenter und nachvollziehbarer Weise darzustellen, warum was wann einem Monitoring unterzogen werden sollte. Gerade das Monitoring stellt eine Möglichkeit dar, die Einlagerung und Endlagerentwicklung extern beobachtbar zu machen. Monitoring ist damit prädestiniert für die Einbindung externer Interessensgruppen.

Steinsalz:

Mit Bezug auf die Unterscheidung der Endlagerkommission hinsichtlich eines Prozess-Monitoring und eines Endlager-Monitoring ist festzustellen, dass im Zusammenhang mit dem Endlager-Monitoring die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Monitoring-Kon-

zepten für ein Endlager im Steinsalz für die drei zu betrachtenden Varianten „steile Lagerung“, „Salzkissen“ und „flache Lagerung“ notwendig ist. Diese Konzepte sollten die oben angesprochenen Aspekte in geeigneter Weise abbilden.

Darüber hinaus wäre ein generelles Konzept für die übertägige Umgebungsüberwachung zu entwickeln, das beispielsweise modular aufgebaut sein sollte, damit eine Anpassung an unterschiedliche Standortgegebenheiten möglich ist. Dieses modulare System könnte dazu dienen, bereits frühzeitig Interessensgruppen die Möglichkeit zu geben, sich einzubringen und an der Entwicklung eines dann standortbezogenen Monitoring-Programms teilzuhaben.

Tongestein:

Im Zusammenhang mit dem Endlager-Monitoring wäre eine Weiterentwicklung der bisherigen im MODERN2020 entwickelten Monitoring-Konzepte für ein Endlager im Tongestein mit vertikaler Bohrlochlagerung und Streckenlagerung notwendig (optional auch für die horizontale Bohrlochlagerung), insbesondere im Hinblick auf die Überprüfung der Annahmen zum radiologischen Nachweis. Die Konzepte sollten die oben angesprochenen Aspekte in geeigneter Weise abbilden.

Darüber hinaus wäre ein generelles Konzept für die übertägige Umgebungsüberwachung zu entwickeln, das beispielsweise modular aufgebaut sein sollte, damit eine Anpassung an unterschiedliche Standortgegebenheiten möglich ist. Dieses modulare System könnte dazu dienen, bereits frühzeitig Interessensgruppen die Möglichkeit zu geben, sich einzubringen und an der Entwicklung eines dann standortbezogenen Monitoring-Programms teilzuhaben.

Kristallingestein:

Mit Bezug auf die Unterscheidung der Endlagerkommission hinsichtlich eines Prozess-Monitorings und eines Endlager-Monitorings ist festzustellen, dass im Zusammenhang mit dem Endlager-Monitoring die Entwicklung von Monitoring-Konzepten für die drei derzeit in Betracht kommenden Einlagerungsoptionen ()

- multipler ewG,
- überlagernder ewG und
- modifiziertes KBS-3-Konzept

notwendig ist. Diese Konzepte sollten die oben angesprochenen Aspekte in geeigneter Weise abbilden.

Darüber hinaus wäre ein generelles Konzept für die übertägige Umgebungsüberwachung zu entwickeln, das beispielsweise modular aufgebaut sein sollte, damit eine Anpassung an unterschiedliche Standortgegebenheiten möglich ist. Dieses modulare System könnte dazu dienen, bereits frühzeitig Interessensgruppen die Möglichkeit zu geben, sich einzubringen und an der Entwicklung eines dann standortbezogenen Monitoring-Programms teilzuhaben.

2.3.8 Betriebssicherheit

Tabelle 18: Forschungsbedarf Betriebssicherheit.

Kapitel 2.3.8 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Er- kundung Repräsen- tative vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Übertägige Er- kundung Weiterfüh- rende vorläu- fige Sicher- heitsuntersu- chungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsun- tersuchungen	
Steinsalz/Tongestein/Kristallgestein: Sicherheitskonzept für die Betriebsphase (einschließlich Bewertung der Vor- und Nachteile von deterministischen und proba- bilistischen Sicherheitsanalysen); ganzheitli- cher Ansatz					X
Durchführung von Betriebssicherheits- und Störfallanalysen auf Basis aktualisierter Endlagerkonzepte oder -auslegungen					X
Abhängigkeiten von Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit					X
Maßnahmen zur Reduktion spezieller Ge- fährdungen oder Risiken (z. B. Behälterab- sturz, Brand, etc.) entwickeln					X
Tongestein: Einfluss Feuchte auf Betriebssicherheit von Maschinen und Geräte					X
Gewährleistung Arbeitssicherheit beim Aus- bau, insbesondere beim Auffahren/durchör- tern von schon betonierten Ausbauten (Druck)					X
Kristallgestein: Einfluss Feuchte auf Betriebssicherheit von Maschinen und Geräte					X
Wasserhaltung/-management					X

Ziel ist es, die im Rahmen von FuE-Vorhaben und internationalen Kooperationen erarbeiteten Ansätze zum Nachweis der Betriebssicherheit für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente als genehmigungsreife Lösung zu entwickeln. Der Nachweis der Betriebssicherheit ist ein wesentlicher Bestandteil des Safety Case eines Endlagers.

Im Abstand von 10 Jahren ist vom Endlagerbetreiber für den Einlagerungsbetrieb jeweils eine Überprüfung auf sicherheitsrelevante Veränderungen des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Beurteilung der Sicherheit von Endlagern durchzuführen und eine Überprüfung und Bestätigung der Sicherheitsnachweise vorzunehmen (BMU 2010). Dabei ist auch der Erfahrungsrückfluss aus dem Betrieb des Endlagers einzubeziehen. Mit dieser Überprüfung und Bestätigung der Sicherheitsnachweise ist nicht nur sicherzustellen, dass im Betrieb des Endlagers z. B. Änderungen der gesetzlichen Bestimmungen, die Modernisierung von Einlagerungstechniken oder der sich weiterentwickelnde Kenntnisstand bei der Bewertung der Anlagensicherheit berücksichtigt werden, sondern auch für die Optimierung des Einlagerungsbetriebs sowie für den Wissenserhalt bei allen Beteiligten Sorge zu tragen.

Alle Wirtsgesteine:

Im Hinblick auf die Betriebssicherheit wurden bisher jeweils Teilaspekte zum Nachweis der Sicherheit betrachtet, z. B. Konzept und Nachweismethode für den Betrieb einer Schachtförderanlage. Ein ganzheitlicher Ansatz oder eine Methode, unabhängig von der

Art des Wirtsgesteins zur Erstellung eines Sicherheitskonzepts für den Endlagerbetrieb, gibt es bisher nicht. Deshalb wird die Notwendigkeit gesehen, einen solchen Ansatz zu entwickeln, der umfassend und präzise beschreibt, was ein Sicherheitskonzept für die Betriebsphase darstellt.

Betriebssicherheits- und Störfallanalysen wurden für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in den 1980er und 1990er Jahren durchgeführt. Insofern wird es als notwendig angesehen, solche Analysen auf Basis aktualisierter Endlagerkonzepte und –auslegungen (VSG) (Bollingerfehr et al. 2012) und derzeit geltender gesetzlichen Grundlagen durchzuführen.

Die gegenseitige Abhängigkeit von Maßnahmen die für die Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit im Endlager erforderlich sind, sollten weiter untersucht werden. Insbesondere sollten Methoden zur Darstellung dieser Abhängigkeit entwickelt werden, um spezielle Gefährdungen oder Risiken (z. B. Behälterabsturz, Brand, etc.) frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden oder zu reduzieren.

Tongestein:

Im Hinblick auf die Gewährleistung eines sicheren Betriebes eines HAW-Endlagers in Tongestein wird es als notwendig angesehen, den Einfluss der vorherrschenden Feuchte (rund 5-10%) auf die Betriebsbereitschaft von Maschinen und Geräten zu untersuchen. Erfahrungen aus der untertägigen Errichtung des Endlagers Konrad können nur bedingt herangezogen werden, weil das dort anstehende Tongestein ungewöhnlich trocken ist.

Aus den bisherigen Arbeiten zur Konzeption eines Endlagers in Tongestein wurde deutlich, dass insbesondere im Hinblick auf eine zu gewährleistende Rückholungsmöglichkeit ein massiver Ausbau aller Strecken auch der Einlagerungsstrecken erforderlich wird. Deshalb wird es als notwendig angesehen, Untersuchungen und Planungen anzustellen, um die Arbeits- und Betriebssicherheit bei der Herstellung der Ausbauten aber insbesondere beim Auffahren und Durchhörtern von schon betonierten Ausbauten zu gewährleisten.

Kristallingestein:

Aufgrund seiner Klüftigkeit muss im Wirtsgestein Kristallin mit zutretenden Wässern gerechnet werden. Das erfordert in jedem Fall einen Plan zur Wasserhaltung und zum Wassermanagement. Bisher gibt es dazu in Deutschland im Rahmen von Endlagerplanungen wenig Kenntnisse und Erfahrungen. Es wird als erforderlich angesehen, solche Planungen und Konzepte zu erarbeiten, um permanent während des Endlagerbetriebes kontrollierte Wasserverhältnisse zu haben.

Damit einhergehende muss untersucht werden, in welchem Maße Geräte und Maschinen gegen solche Feuchtebedingungen auszulegen sind, um dauerhaft Betriebssicherheit zu gewährleisten.

2.4 Sicherheitsbetrachtungen

2.4.1 Sicherheitsstrategie

Der entscheidende Faktor bei der Planung und dem Bau eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgedienter Brennelemente ist die Gewährleistung der Sicherheit während des Betriebes und langfristig danach (Nachweiszeitraum 1 Mio. Jahre). In nationalen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerken sind die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland festgelegt. Das übergeordnete Ziel beim Umgang mit radioaktiven Stoffen wird im Atomgesetz (AtG 2018) § 1 Abs. 2 beschrieben. Weitere Rahmenbedingungen für die Endlagerung werden im Strahlenschutzgesetz (StrlSchG 2017), dem Bundesberggesetz (BBergG 2017) mit den zugehörigen Verordnungen festgelegt. Internationale Empfehlungen existieren von der ICRP, der IAEA sowie der OECDNEA, (IAEA 2011a, IAEA 2011c, IAEA 2012, NEA 2004, NEA 2013, ICRP 2007 und ICRP 2013). In den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010) sind ebenfalls entsprechende Schutzziele für ein solches Endlager definiert. Demnach gilt die Sicherheit eines Endlagers als gewährleistet, wenn diese allgemeinen Schutzziele eingehalten werden können. Aktuell befinden sich diese Sicherheitsanforderungen in der Überarbeitung, insbesondere im Nachgang zu dem Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Abschlussbericht 2016).

2.4.1.1 Generelles Sicherheits- und Nachweiskonzept

Tabelle 19: Forschungsbedarf generelles Sicherheits- und Nachweiskonzept.

Kapitel 2.4.1.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentati ve vorläufige Sicherheits- untersuchun gen	Übertägige Erkundung Weiterführen de vorläufige Sicherheits- untersuchun gen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheits- untersuchun gen	
Methode zur Ausweisung der Lage und Grenzen eines ewG		X			
Methode zum Nachweis des Erhalts eines ewG		X			
Entwicklung eines detaillierten Konzeptes für die Weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (WVS) Umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (UVS)		X	X		
Quantifizierung von Kriterien für den radiologischen Nachweis im Kristallin					X
Anwendbarkeit des RGI im Kristallin im Rahmen des 'Modifizierten KBS-3-Konzeptes'					X
Szenarien zur Bewertung von „Human Intrusion“					X



Ziel ist es die entwickelte Methodik des Nachweises der Sicherheit am Rande des ewG als genehmigungsreife Lösung zu erhalten. Dabei ist zu überprüfen, ob diese Lösung auch für alle Wirtsgesteine anwendbar ist oder wie alternativ ein Sicherheits- und Nachweiskonzept auszusehen hat für Wirtsgesteine, denen keine oder nur eingeschränkte

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:07:07 +01'00'

Diese Aufzählung erscheint viel zu eng: Sie zielt fast ausschließlich auf Nachweisaspekte (also auf das Nachweiskonzept), während Maßnahmen zum Erreichen von Sicherheit (Sicherheitskonzept) praktisch nicht vorkommen. Gleiches gilt für den nachfolgenden Text.

Sicherheitsfunktionen im Hinblick auf den Einschluss der radioaktiven Abfälle zugewiesen werden können. Darüber hinaus ist es wichtig zu klären, ob die Nachweismethode mittels des RGI allgemein in einem Verfahren akzeptiert werden kann.

2.4.1.2 Regulatorische Aspekte


Tabelle 20: Endlagerforschung Regulatorische Aspekte.


Kapitel 2.4.1.2 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Konkretisierung und Präzisierung die Anwendung des Standes von W&T im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle und seine Komponenten	1				x
Ermittlung der Nachweiserfordernisse aus maßgeblichen Rechtsgebieten und regulatorischen Ebenen für Endlager im Tongestein und im Kristallin mit und ohne Bezug zur geologischen Barriere		x			
Ermittlung der Nachweiserfordernisse aus maßgeblichen Rechtsgebieten und regulatorischen Ebenen für Endlager im Tongestein und Kristallin mit Bezug auf Herstellung und Betrieb eines Endlagerbergwerkes			x	x	
Ermittlung der Nachweiserfordernisse aus maßgeblichen Rechtsgebieten und regulatorischen Ebenen für Endlager im Tongestein und Kristallin mit Bezug auf den Verschluss eines Endlagerbergwerkes			x	x	

In einem umfassenden Safety Case sind die Nachweiserfordernisse aus den maßgeblichen Rechtsgebieten und regulatorischen Ebenen zu berücksichtigen. Hieraus ergeben sich Informations- und Klärungsbedarfe insbesondere zur Anwendung von Bestimmungen zur technischen Ausführung in der operativen Umsetzung. Die Berücksichtigung des Standes von Wissenschaft und Technik im Hinblick auf die Schadensvorsorge ist von Relevanz für die prototypischen Sicherheitsuntersuchungen und ggf. für die Standorterkundung. Es besteht Konkretisierungsbedarf zur angemessenen Anwendung.

2.4.1.3 Sicherheitsnachweis

Derzeit überarbeitet das BMU die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Nach StandAG (2017) obliegt es dem BMU, die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle anzupassen. Das in den Sicherheitsanforderungen beschriebene ewG-Konzept ist bisher nur auf Steinsalz und Tongestein ausgerichtet. Auch ist der wirtsgesteinsspezifische Umgang mit den Integritätskriterien in den Sicherheitsanforderungen nicht im Detail reguliert und damit oftmals Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion. Aus diesem Grund findet aktuell eine Überarbeitung der Sicherheitsanforderungen nach den Empfehlungen

 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:13:38 +01'00'
Unklare Formulierung. Was ist gemeint?

 Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:13:16 +01'00'
Reihenfolge: Erst, wenn man das weiß, kann man ein Nachweiskonzept erstellen!

der Endlagerkommission und auf Grundlage des StandAG (2017) statt. Wenn die Ergebnisse vorliegen, wird die BGE die Umsetzung prüfen und ggf. daraus entstehende FuE-Bedarfe ableiten.

2.4.1.4 Lernendes selbsthinterfragendes Verfahren

Tabelle 21: Forschungsbedarf lernendes und selbsthinterfragendes Verfahren.

Kapitel 2.4.1.4	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Entwicklung von Möglichkeiten für eine Adaption der Ansätze für eine reflektierende Kultur unter dem Stichworten "Sicherheitskultur" und „Sicherheitsmanagement“	X				
Entwicklung geeigneter externen Prüfmechanismen, die Außenstehenden und der Öffentlichkeit Anhaltspunkte für die tatsächlich vorhandene Sicherheits- oder Selbstreflexions-Kultur der handelnden Institutionen geben		X			


Die Gestaltung des Endlagerprozesses als selbsthinterfragendes und lernendes Verfahren verfolgt die Zielsetzung, die langfristige, sicherheitsrelevante Aufgabe kontinuierlich auf höchstem Sicherheitsniveau und mit der erforderlichen Flexibilität zur Vermeidung von Fehlern und unerwünschten Entwicklungen aber auch vorbereitet auf erforderliche Verfahrensrücksprünge durchzuführen. Es besteht der Bedarf für die Entwicklung von Möglichkeiten einer Adaption bestehender Ansätze für eine reflektierende Kultur unter dem Stichwort Sicherheitskultur und von Prozessen zur Implementierung des Systems. Es ist zu klären, inwieweit externe Prüfmechanismen für die Angemessenheit und Umsetzung des Systems zu entwickeln und einzuführen sind.



2.4.1.5 Vergleich von Endlagersystemen

Tabelle 22: Forschungsbedarf Vergleich von Endlagersystemen.

Kapitel 2.4.1.5	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Entwicklung von Bewertungsmaßstäben für einen sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagersystemen					X
Entwicklung von Verfahren zur Prüfung des Einflusses von Wichtungsfaktoren zu den geowissenschaftlichen, wasserwirtschaftlichen, raumplanerischen und sozio-ökonomischen Vergleichskriterien auf das Standortauswahlverfahren					X RESUS

 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:34:51 +01'00'

Der gesamte Absatz ist sehr vage formuliert.

In Deutschland kommen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht. Aufgrund unterschiedlicher petrophysikalischer Eigenschaften müssen auf diese Eigenschaften zugeschnittene technische Endlagerkonzepte, inklusive eines Verfüll- und Verschlusskonzeptes, entwickelt werden. Der sicherheitsgerichtete Vergleich von potenziellen Endlagerstandorten erfordert einen Vergleich von Endlagersystemen, die auf unterschiedlichen Sicherheitskonzepten beruhen. Es sind methodische Ansätze zu entwickeln, die eine Gesamtaussage bezüglich des Sicherheitsniveaus der Endlagersysteme in unterschiedlichen Wirtsgesteinen zulassen und einen sicherheitsgerichteten Vergleich der verschiedenen miteinander zu vergleichenden Standorte ermöglichen. In die Überlegungen müssen dabei auch übergeordnete Fragestellungen, wie z. B., was die Vorgabe der bestmöglichen Sicherheit in Bezug auf den sicheren Einschluss bedeutet oder welchen Stellenwert Ausmaß, Dauer, Zeitpunkt und Wahrscheinlichkeit möglicher Freisetzungen im Verhältnis zur Diversität und Redundanz des Einschlusses vor dem Hintergrund von bekannten bzw. bisher unerkannten Ungewissheiten haben, einbezogen werden. Dazu müssen Bewertungsmaßstäbe abgeleitet werden, die für die drei Wirtsgesteinsoptionen eingesetzt werden können.

2.4.2 FEP-Kataloge und Szenarienentwicklung

Entsprechend einem internationalen Konsens bilden eine umfassende Beschreibung des Endlagersystems durch einen FEP-Katalog (features, events and processes) sowie eine daraus abgeleitete Prognose der zukünftigen Entwicklung (Szenarienentwicklung) wesentliche Bestandteile für die Analyse der Sicherheit des Endlagersystems (NEA 2016). Dieses methodische Grundprinzip wird auch in den deutschen Sicherheitsnachweisen angewendet (z. B. Fischer-Appelt et al. 2014, Jobmann et al. 2017a). Eine Besonderheit der deutschen Vorgehensweise nach der VSG-Methodik ist, dass sich die Szenarien, unter Berücksichtigung des Sicherheitskonzeptes, systematisch und stringent direkt aus dem FEP-Katalog ableiten. Struktur und Inhalt der FEP-Kataloge werden an diese Methodik angepasst.

Neben den systematisch abgeleiteten Szenarien sind auch stilisierte Szenarien, wie z. B. unwahrscheinliche Entwicklungen, what-if-Szenarien und Human-Intrusion-Szenarien, zu betrachten (Press et al. 2008, Orzechowski et al. 2018).

Gemäß Standortauswahlgesetz (StandAG 2017) sind während der verschiedenen Verfahrensschritte der Erkundung vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen, die sich entsprechend dem fortschreitenden Kenntnisstand kontinuierlich konkretisieren (repräsentative - weiterentwickelte - umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen).

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:37:15 +01'00'

Unklar: Was ist Diversität und Redundanz des Einschlusses? Zielt das auf Robustheit ab? Empfehlung: Auch Robustheit als Vergleichsmaßstab benennen!

Nummer: 2 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:38:01 +01'00'

In diesem Abschnitt fehlt der Bezug zu den Sicherheitsuntersuchungen.

2.4.2.1 FEP-Katalog

Tabelle 23: Forschungsbedarf FEP-Katalog.

Kapitel 2.4.2.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Optimierung der Methode zur Integrierung der umfangreichen Informationen des FEP-Katalogs in die Szenarienbeschreibung					X
Erstellung von Referenz-FEP-Katalogen für Salzstöcke und flach lagernde Salzformationen		X			
Erstellung von Referenz-FEP-Katalogen für Tonformationen		X			
Erstellung von Referenz-FEP-Katalogen für Kristallinformationen		X			
Programmierung einer FEP-Datenbank, die die Anforderungen der systematischen Szenarientwicklung erfüllt.					X
Harmonisierung von Struktur und Inhalt der FEP-Kataloge in verschiedenen Wirtsgesteinstypen sobald die Referenzmethodik für die Szenarientwicklung festgelegt wurde.					X



Ziel des FEP-Katalogs ist es, alle Komponenten und Prozesse, die für die derzeitige und die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems relevant sind, zu identifizieren und zu charakterisieren (Beuth et al. 2012). Weiterhin enthält der FEP-Katalog Informationen, die für die Ableitung der Szenarien notwendig sind, so z. B. die Identifizierung von FEP, die sich unmittelbar auf die Funktion sicherheitsrelevanter Barrieren auswirken (Initial-FEP), die Eintrittswahrscheinlichkeit der FEP sowie die Wechselwirkung mit anderen FEP.

Die Weiterentwicklung und Optimierung von Struktur und Inhalt des FEP-Katalogs, die im Zuge des Projektes ANSICHT begonnen wurde, ist noch nicht abgeschlossen. Ein wichtiger neuer Aspekt war die Systematisierung der Komponentenbeschreibung durch Definition einer Liste von chemisch-physikalischen Eigenschaften und deren Verknüpfung mit einwirkenden/beeinflussten Prozessen. Dies ermöglicht eine sehr detaillierte Beschreibung der stattfindenden Entwicklungen. In diesem Kontext ist zu klären, ob und in welcher Weise, die so generierte große Datenmenge sinnvoll und effektiv in die systematische Szenarienbeschreibung integriert werden kann.

Sobald die grundlegende Festlegung von Struktur und Inhalt des FEP-Katalogs erfolgt ist, sollten Referenzkataloge (Datenbank) für die Wirtsgesteine erstellt werden, die im Hinblick auf die angestrebte Vergleichbarkeit harmonisiert werden sollten. Da es sich um grundlegende methodische Arbeiten handelt, sollten sie in einem frühen Stadium der Standorterkundung durchgeführt werden.

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:40:19 +01'00'

Müssten die Referenz-FEP-Kataloge in den nachfolgenden Phasen nicht konkretisiert / detailliert / standortspezifisch angepasst werden? In jedem Fall ist eine Weiterentwicklung auch in Bezug auf die weiterentwickelten Endlagerkonzepte abzusehen.

2.4.2.2 Szenarientwicklung

Tabelle 24: Forschungsbedarf Szenarientwicklung.

Kapitel 2.4.2.2 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsen- tative vorläu- fige Sicher- heitsuntersu- chungen	Übertägige Erkundung Weiterfüh- rende vorläu- fige Sicher- heitsuntersu- chungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsuntersu- chungen	
Auswirkungen der geänderten FEP-Katalogstruktur gemäß ANSICHT (Modell-SÜD) auf die Methodik der Szenarientwicklung					X
Auswirkungen der Definition der Initial-Barrieren auf die Szenarientwicklung (Salz)					X
Ausgangspunkte für die Szenarientwicklung in Tongesteinen		X			X
Ausgangspunkte für die Szenarientwicklung in Kristallingestein		X			X
Methodik für die Ableitung der Ausprägungen der Prozess-FEP					X
Benchmarking für verschiedene Methoden der Szenarientwicklung					X
Weiterentwicklung der Methode zur Behandlung unwahrscheinlicher Entwicklungen		X			X
Methode zur Ableitung repräsentativer (abdeckender) Szenarien		X			X
Methode zur Ableitung repräsentativer Rechenfälle		X			X




1

Die Szenarientwicklung ist die systematische Herleitung und Beschreibung der Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit des Endlagers relevant sind. Ein Szenarium beschreibt eine von den derzeitigen Standortverhältnissen ausgehende, mögliche, zukünftige Entwicklung des Endlagersystems und all seiner sicherheitsrelevanten Eigenschaften. Gemäß den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) sind zum Abdecken der Ungewissheiten bei der Prognose der zukünftigen Standortentwicklung wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien abzuleiten. Weiterhin sollen „unwahrscheinliche Szenarien“ im Hinblick auf ihre Konsequenzen und Vorsorgemaßnahmen zu ihrer Vermeidung geprüft werden.

Struktur und Inhalt des ISIBEL/VSG-FEP-Katalogs wurden im Zuge des FuE-Projektes ANSICHT weiterentwickelt. Es ist zu prüfen, welche Konsequenzen sich hieraus für die Methodik der Szenarientwicklung ergeben. Entsprechend dem Ergebnis dieser Bewertung ist eine Referenzmethodik für die Szenarientwicklung festzulegen und die FEP-Kataloge sind entsprechend anzupassen.

Gemäß der ISIBEL/VSG-Methodik werden die Ausgangspunkte für die Szenarientwicklung unter Berücksichtigung des Sicherheitskonzeptes aus den relevante Barrieren (Initial-Barrieren) und den auf sie einwirkenden Prozesse (Initial-FEP) abgeleitet. Bezüglich der Initial-Barrieren ist zu prüfen, ob die Beschränkung auf Barrieren, die bereits unmittelbar nach Verschluss des Endlagers eine Einschlussfunktion übernehmen, sinnvoll ist ("Versatz" wird z. B. nicht direkt berücksichtigt). Es ist zu prüfen, ob sich hieraus Defizite bei der Szenarienbeschreibung ergeben.

Da sich die Ausgangspunkte für die Szenarienbeschreibung aus dem gesteinspezifischen Sicherheitskonzept ableiten, ist zu prüfen, ob die Definition der (salzspezifischen) "Initial-Barrieren" auch für Ton- und Kristallingesteine (drei Endlagerkonzepte) sinnvoll

 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:41:49 +01'00'

Es erscheint sehr anspruchsvoll, al dies bereits in der ersten Phase der Standortauswahl bewältigen zu wollen. Gestuftes Vorgehen?

ist oder ob hier andere Ansätze verfolgt werden sollten. Entsprechend dem Ergebnis dieser Bewertung ist eine Referenzmethodik für die Szenarienentwicklung festzulegen und die FEP-Kataloge sind entsprechend anzupassen.

Bei der Ableitung der Ausprägungen der Initial-FEP werden bisher, aufgrund der Handhabbarkeit, nur die einwirkenden FEP der ersten beiden Abhängigkeitsebenen beschrieben. Es ist zu prüfen, ob es durch diese Beschränkung zu Defiziten bei der Beschreibung der Systementwicklung kommt.

2.4.3 Integritätsnachweise geotechnische Barrieren

Bei Endlagern für hochradioaktive Abfälle wird der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Inventars in Salz- und Tongesteinen in erster Linie durch das Wirtsgestein und dem ewG sichergestellt, während in kristallinen Gesteinen auch technische und geotechnische Barrieren die ausschließliche Einschlussfunktion übernehmen können, sofern kein ewG ausgewiesen werden kann.

Auch die bergmännischen Hohlräume innerhalb des ewG sowie die Zugänge zum ewG sind in geeigneter Weise langzeitsicher zu verschließen. Bis die Resthohlräume im versetzten Grubengebäude im Falle von Salz- und Tongesteinen durch die Gebirgskonvergenz und das Quellen des Versatzes wieder vollständig verschlossen sind, übernehmen geotechnische Barrieren die bedeutende Abdichtfunktion und verschließen potenzielle Wegsamkeiten entlang der technisch geschaffenen Hohlräume. Der Einschluss der radioaktiven Inventare im Endlager soll durch ein diversitäres und redundantes Barrierensystem sichergestellt werden, das auch den Ausfall einzelner Barrierenkomponenten verkraften kann. Letzteres gilt auch für den Fall des Wirtsgesteins Kristallin, falls im Kristallingestein selbst oder überlagernden Gesteinen ein oder mehrere ewG ausgewiesen werden können.

Ziel ist es, den Nachweis zu führen, dass das geotechnische Barrierensystem seine Dichtfunktion innerhalb des oder der ewG über den Nachweiszeitraum erhalten kann. Um diesen Nachweis führen zu können, müssen zum einen die Eigenschaften der einzelnen Barrierekomponenten bekannt sein und zum anderen müssen die Prozesse bekannt sein, die im Zuge der Endlagerentwicklung auf die Barrieren einwirken. Aus dem Vergleich der Einwirkungen auf die Barrieren mit deren Widerstandsfähigkeit erfolgt sowohl der Nachweis der strukturellen Integrität als auch der Dichtheitsnachweis.

2.4.3.1 Einwirkende Prozesse auf das Barriersystem

Tabelle 25: Forschungsbedarf einwirkende Prozesse auf das Barriersystem.

Kapitel 2.4.3.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz Ermittlung prototypischer Verfüll- und Verschlussysteme und Modifikationen und Ermittlung von Einwirkungen/Prozessen sowie Anwendung ausgewählter Abwägungskriterien					X
Ermittlung eines Katalogs konstruktiver Maßnahmen, um die Relevanz von Einwirkungen/Prozessen zu vermeiden und die Zahl der Kopplungen gering zu halten.					X
Präzisierung des FEP Alteration für Verfüll- und Verschlussmaßnahmen im Salz					X
Standortspezifische Entwicklung und Optimierung von Verschlussystemen			X	X	
Ermittlung möglicher Gaseinwirkungen (im Porenraum) für verschiedene Szenarien					X
Einschätzung der Relevanz der Gaszusammensetzungen auf die Alteration von Barrierematerialien					X
Ggf. technische Konzepte zur künstlichen Alteration von Barrierematerialien					X
Tongestein/Kristallgestein Untersuchungen zur Funktionsdauer von sofort wirksamen Asphalt-Dichtelementen unter verschiedenen Standortbedingungen			X		X
Untersuchung zur Dauer des transienten Prozesses der Aufsättigung des Versatzes unter verschiedenen Standortbedingungen				X	X
Untersuchung zur Dauer des Prozesses der Ausbaurkorrosion unter verschiedenen Standortbedingungen				X	X AGEnT
Untersuchungen zu den sich final einstellenden Eigenschaften des Versatzes nach Abschluss der transienten Phase unter verschiedenen Standortbedingungen. Speziell für die Durchlässigkeitsentwicklung des Versatzes und sein Rückhalte- bzw. Sorptionsvermögen.			X	X	
Untersuchung, unter welchen Bedingungen die Leistungsziele der einzelnen Barrierekomponenten erreicht werden können.					X
Untersuchung des Kompaktionsverhaltens des Versatzes unter in situ Spannungsbedingungen bei gleichzeitigem Quellprozess seiner quellfähigen Tonminerale				X	
Erarbeitung einer vollständigen Lastfallanalyse für alle Barrieren und deren Komponenten unter ggf. verschiedenen Standortbedingungen				X	
Bewertung der Auswirkungen mikrobieller Prozesse auf die Versatzeigenschaften im Nachweiszeitraum				X	
Bestimmung der Art und Menge der gebildeten Gase in einem Endlager im Ton-/Kristallgestein für die zu betrachtenden Einlagerungskonzepte auf Basis von Referenzlösungen			X		
Bestimmung der Gasbildungsraten in einem Endlager im Ton-/Kristallgestein für die zu betrachtenden Einlagerungskonzepte auf Basis von Referenzlösungen			X		
Kristallgestein Untersuchungen bezüglich Korrosionsraten von Kupfer in der Umgebung salinärer Lösungen und der damit verbundenen Gasbildung.					X

Steinsalz:

Die unvermeidlichen Zuwegungen zu den radioaktiven Abfällen in einem Endlager im Salzgestein sind durch ein Verfüll- und Verschlusskonzept so zu verschließen, dass ein sicherer Einschluss gewährleistet ist. Da die hohe Zahl der kombinatorischen Möglichkeiten von Verschlusskomponenten nicht sinnvoll behandelt werden kann, wird hier eine mögliche Vorgehensweise beschrieben, diese Fragestellung zu behandeln.

Im ersten Schritt ist zu klären, welche prototypischen Verschlussysteme genutzt werden sollen und wie sie ggf. modifiziert werden, da anwendbare Kriterien, die für die geologische Barriere günstig sind, sich grundsätzlich auch für die Bewertung von Verfüll- und Verschlussmaßnahmen eignen. Für die gewählten Verfüll- und Verschlussysteme sind die Einwirkungen und Prozesse auf Grundlage der integritätsverletzenden FEP-Szenarien zu identifizieren und der Kenntnisstand dazu ist zu ermitteln. Dann sollte in einem weiteren Schritt ein Katalog konstruktiver Maßnahmen entwickelt werden, der auf die Vernachlässigbarkeit von Einwirkungen und Prozessen und die Vermeidung von Kopplungen abzielt. Dies gilt insbesondere für chemische und biologische Einwirkungen/Prozesse. Zu den verbleibenden Einwirkungen und Prozessen wird der Informationsbedarf ermittelt.

Informationsbedarf besteht aus heutiger Sicht insbesondere zu den Prozessen, die unter dem unscharfen FEP "Alteration" zusammengefasst sind. Der FEP "Alteration" ist für die prototypischen Verfüll- und Verschlussysteme zu präzisieren und zu prüfen, ob weitergehender FuE-Bedarf besteht. Zu einem späteren Zeitpunkt können die Verschlussysteme durch Austausch oder Ergänzung von Komponenten optimiert werden.


Bezüglich der Gasentwicklung ist zu klären, welche "Gaseinwirkungen" für die verschiedenen Szenarien denkbar sind, die aus dem sicheren Einschluss für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen resultieren. Technische Analogien sind einzubeziehen.

Die Relevanz der Gaszusammensetzung auf die Alteration ist einzuschätzen und ggf. sind Konzepte zu entwickeln, Materialien geotechnischer Barrieren künstlich zu altern. Abschließend sind die auslegungsbestimmenden Materialparameter zu ermitteln, die das mechanische und hydraulische Verhalten bestimmen sowie die Langzeitbeständigkeit. Diese Fragestellung ist erst im Zusammenhang mit dem Paradigmenwechsel von der begrenzten Freisetzung zum sicheren Einschluss aufgetreten und ist entsprechend ihrem Entwicklungsstand noch der Grundlagenforschung zuzuordnen.

Tongestein/Kristallingestein:

In den aktuellen Verschlusskonzepten ist die Funktionsdauer von Asphalt-Dichtelementen auf den Zeitraum begrenzt, bis die Bentonit-Dichtelement die volle Aufsättigung und damit ihre volle Dichtwirkung erreicht haben (Jobmann 2018a). Es wird eingeschätzt, dass die Beständigkeit des Asphaltes für diesen Zeitraum gewährleistet werden kann (). Die Begrenzung der Funktionsdauer begründet sich im Wesentlichen aus einem ungenügenden Kenntnisstand zur mikrobiellen und chemischen Alteration der eingesetzten Bitumen. Für die zu führenden Nachweise sollte die unter den Standortbedingungen stattfindenden mikrobiellen Prozesse sowie deren Auswirkungen auf die Bitumeneigenschaften geeignete Prozessanalysen unter verschiedenen



 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:54:53 +01'00'

Das gehört eigentlich in Abschnitt 2.3

in situ- und Standortbedingungen konkretisiert und damit die Funktionsdauer genauer bestimmt werden.

Bezüglich des Versatzes ist zu analysieren, wie dessen Verhalten unter in situ Spannungsbedingungen bei gleichzeitigem Quellprozess seiner quellfähigen Tonminerale abläuft. Sowohl dieser transiente Prozess, als auch die sich anschließend final einstellenden Eigenschaften des Versatzes müssen abgeschätzt werden. Dies gilt nicht nur für die Durchlässigkeitsentwicklung des Versatzes, sondern auch für die tonbasierten Dichtelemente sowie deren Rückhalte- bzw. Sorptionsvermögen. Über die Dauer des Aufsättigungsprozesses sollen im Rahmen des Projektes CHRISTA-II abschätzende Berechnungen durchgeführt werden.

Ein wesentlicher Punkt in dem Zusammenhang ist die Alteration bzw. die Korrosion von Materialien mit Zementphasen (Betone), die z. B. für Widerlager von Verschlussbauwerken verwendet werden. Durch chemische Berechnungen sollte ermittelt werden, welche Funktionsdauer solchen Widerlagern unter in situ-Bedingungen zugeordnet werden kann.

Ebenfalls ausstehend ist eine Bewertung der Auswirkungen mikrobieller Prozesse auf die Eigenschaften der Versatz- und Verschlussmaterialien innerhalb des Nachweiszeitraumes.



Bezüglich einer Gasbildung in einem Endlager im Kristallingestein sind bisher keine Abschätzungen erfolgt. Für den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrierekomponenten ist der Druckaufbau durch Gasbildung ein zu berücksichtigender Lastfall. Eine Bestimmung der Gasbildungsraten unter ggf. standortabhängigen in situ-Bedingungen ist notwendig. Dies kann allerdings erst dann erfolgen, wenn neben der Konkretisierung des Behälterkonzeptes und damit des Metallinventars auch Informationen über die Lösungszusammensetzung im jeweils zu betrachtenden Wirtsgestein vorliegen oder geeignete Referenzlösungen definiert wurden. Mit Blick auf die derzeitigen Endlagerkonzepte für Kristallin als Wirtsgestein (Bertrams et al. 2017) ist davon auszugehen, dass (zumindest in den Konzepten mit ewG) die Endlagerbehälter eine Kupferummantelung haben werden. Für eine Konkretisierung des Behälterkonzeptes und der Gasbildung durch Korrosion fehlen Untersuchungen zur Kupferkorrosion unter ggf. hoch salinaren Bedingungen und unter mikrobiellem Einfluss.

Für die in der Entwicklung befindlichen Verfüll- und Verschlusskonzepte für ein Endlager im Kristallin ist eine vollständige Einwirkungsanalyse für alle Barrieren und deren Einzelkomponenten noch nicht erfolgt. Erste exemplarische Einwirkungsanalysen sollen im Rahmen des Projektes CHRISTA-II erfolgen. Ist dies erfolgt, liegt ein Muster vor, in welcher Weise eine Einwirkungsanalyse durchgeführt werden kann. Im Rahmen von CHRISTA-II wird man noch auf viele Übertragungen aus anderen Endlagerprojekten angewiesen sein, da noch keine Informationen aus Standortuntersuchungen vorliegen werden. Liegen Standortinformationen vor, kann dieses Muster genutzt werden, um Einwirkungsanalysen sukzessive zu konkretisieren.

 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:56:36 +01'00'

Sollten nicht auch Auswirkungen einer erhöhten Temperatur untersucht werden? Möglicherweise in Zshg. mit "Opferschichten" etwa im Bentonit?

2.4.3.2 Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle)

Tabelle 26: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle).

Kapitel 2.4.3.2 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz Ermittlung prototypischer Verfüll- und Verschlussysteme und Modifikationen und Ermittlung von Einwirkungen/Prozessen sowie Anwendung ausgewählter Abwägungskriterien.		X			
Ermittlung eines Katalogs konstruktiver Maßnahmen, um die Relevanz von Einwirkungen/Prozessen zu vermeiden und die Zahl der Kopplungen gering zu halten.					X
Präzisierung des FEP Alteration für Verfüll- und Verschlussmaßnahmen im Salz.					X
Zusammenstellung prototypischer Beispiele und Funktionsprüfung von Stoffmodellen und Schließen von Wissenslücken für die jeweils nachfolgende Phase.		X	X	X	X
Zusammenstellung von Modellansätzen für Kontaktzonen zwischen Salzkontur, unterschiedlichen Materialien und Prüfung ihrer Eignung sowie für das Schließen von Wissenslücken für die jeweils nachfolgende Phase.		X	X	X	X
Tongestein/Kristallingestein Entwicklung vollumfänglicher Stoffmodelle für die Abbildung TH2M-Prozesse inklusive Quellprozess für in Frage kommende Barrieretypen.			X	X	X
Weiterentwicklung von Endlagerkonzepten im Hinblick auf eine vollständige Materialcharakterisierung als Grundlage für die Berechnung chemischer Alterationsprozesse.		X	X	X	
Entwicklung von Referenzlösungen zur Abdeckung der Bandbreite natürlich vorkommender Lösungen innerhalb in Frage kommender Gesteinskomplexe.		X	X	X	X
Entwicklung einer thermodynamischen Datenbank für Lösungen innerhalb in Frage kommender Gesteinskomplexe.		X	X	X	X

Generell ist für alle mathematischen Abbildungen der Prozesse (Stoffmodelle) zu prüfen, ob und inwieweit der bestehende Kenntnisstand zu Einwirkungen und Prozessen für die Nachweisführung ausreicht oder zu ergänzen ist. Grundsätzlich ist festzustellen, dass der Wissenstand zu thermischen und mechanischen Einwirkungen und Prozessen gut und zu hydraulischen Einwirkungen und Prozessen akzeptabel ist. Zu chemischen Einwirkungen und Prozessen und biologischen Einwirkungen und Prozessen (unscharfer Begriff Alteration) besteht Informationsbedarf, sofern sie aufgrund mangelnder Relevanz nicht vernachlässigt werden können. Dies gilt auch für die Kopplungen. Bekannt ist, dass mittels konstruktiver Maßnahmen die Zahl der Kopplungen geringgehalten werden kann. Insofern muss der Prozess und das ihn beschreibende Stoffmodell mit Bezug zu seinem Anwendungszweck betrachtet werden.

Salzgestein:

Aufgrund der Vielzahl möglicher Randbedingungen und Kombinationsmöglichkeiten von Verschlusselementen muss eine Vorgehensweise entwickelt werden, um Defizite und

Wissenslücken zu ermitteln und diese dann gezielt im Hinblick auf die Verschlussysteme zu beseitigen.

Vorgehensweise zur Defizitermittlung:

Im ersten Schritt ist zu klären, welche prototypischen Verschlussysteme genutzt werden sollen und wie sie ggf. modifiziert werden, z. B. unter Berücksichtigung ausgewählter Abwägungskriterien (StandAG 2017), da anwendbare Kriterien, die für die geologische Barriere günstig sind, sich grundsätzlich auch für die Bewertung von Verfüll- und Verschlussmaßnahmen eignen. Für die gewählten Verfüll- und Verschlussysteme sind die Einwirkungen und Prozesse zu identifizieren und der Kenntnisstand dazu ist zu ermitteln. Weiterhin sollte in einem zweiten Schritt ein Katalog konstruktiver Maßnahmen entwickelt werden, der auf die Vernachlässigbarkeit von Einwirkungen und Prozessen und die Vermeidung von Kopplungen abzielt. Dies gilt insbesondere für chemische und biologische Einwirkungen und Prozesse. Zu den verbleibenden Einwirkungen und Prozessen besteht Informationsbedarf. Das sind insbesondere die, die unter dem unscharfen FEP "Alteration" zusammengefasst sind. Der FEP "Alteration" ist für die prototypischen Verfüll- und Verschlussysteme zu präzisieren und zu prüfen, ob weitergehender FuE-Bedarf besteht.

Parallel dazu ist die Verfügbarkeit geeigneter Stoffmodelle und Rechenmodelle für den jeweiligen Anwendungsfall zu ermitteln und ihre Funktion anhand prototypischer Beispiele zu prüfen. Festzuhalten ist dabei auch der Validierungsstatus der einzelnen Modelle, wobei insbesondere ihre Gültigkeit in Bezug auf lange Funktionszeiträume zu bewerten ist. Dabei zeigen sich bestehende Defizite und Wissenslücken, die für die jeweils nachfolgende Phase zu schließen sind.

Einen Sonderfall stellt die Kontaktzone dar, für die eine Beschreibung der Prozesse auf der Mikroskala erfolgen muss. Hier sind frühzeitig geeignete Ansätze zu entwickeln und auf ihre Eignung zu überprüfen. Modellansätze zur Beschreibung der zur Rissbildung in der Auflockerungszone (VerA) (Bollingerfehr et al. 2011c), (Müller et al. 2016), zur druckgetriebenen Perkolation () oder Ansätze der UPC (DOPAS) (Czaikowski et al. 2016) könnten eine Grundlage bilden. Diese Fragestellung ist der Grundlagenforschung zuzuordnen, obwohl für die Lösung dieser Fragestellung dringend Handlungsbedarf besteht. Auch hier werden sich bestehende Defizite und Wissenslücken zeigen, die für die jeweils nachfolgende Phase zu schließen sind.

Tongestein:

Werden im Zuge der Standortauswahl Tonformationen ausgewiesen, deren Lösungsinventar signifikant von der Referenzlösung abweichen, ist zu prüfen, ob ggf. ein anderer Bentonit, als der als Referenz für Dichteelemente verwendete Ca-Bentonit, zum Einsatz kommen sollte, da dadurch ggf. eine bessere Kompatibilität erreicht werden kann, wodurch Alterationsprozesse minimiert werden könnten.

Tongestein/Kristallingestein:


Die bisherigen Stoffmodelle zur Beschreibung der Migration von Fluiden im versetzten und verschlossenen Grubengebäude können nur dann für einen Nachweis herangezogen werden, wenn aufgrund von konservativen Annahmen auf eine Simulation der mechanischen Prozessklasse verzichtet werden kann. Durch die Nicht-Berücksichtigung

mechanischer Effekte würde zum einen der Prozess der Kompaktion des Verfüllmaterials vernachlässigt. Eine mechanische Kompaktion würde zu einer Reduzierung der Permeabilität des Materials führen. Zum anderen würde auch die zeitliche Veränderung der Auflockerungszone nicht abgebildet, die ebenfalls eine Reduzierung ihrer Permeabilität bedeuten würde. Beides sind nachteilige Faktoren, die speziell für die transiente Phase den Nachweis erschweren. Durch vollumfängliche, auch mit der mechanischen Prozessklasse gekoppelte Stoffmodelle für unterschiedliche geotechnische Barriere-Komponenten (Dichtelemente aus Formsteinen und/oder Granulaten sowie Versatz) ließen sich diese Nachteile beseitigen.


Zur Berechnung chemischer Alterationsprozesse sollten Endlagerkonzepte dahingehend weiterentwickelt werden, dass darin eine vollständige Materialcharakterisierung erfolgt. Unter Definition von zunächst Referenzlösungen ließen sich dann die chemischen Alterationsprozesse genauer beschreiben. Dadurch könnte unter anderem geklärt werden, ob nach Abschluss der transienten Phase noch mit signifikanten Alterationen der Verschlussbauwerke und Versatzmaterialien im Nachweiszeitraum zu rechnen ist.

2.4.3.3 Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise

Tabelle 27: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise.

Kapitel 2.4.3.3	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz Festlegung einer Modellierungsstrategie und Vorgehensweisen zum Umgang mit Up- und Downscaling Prozeduren in Bezug auf Komponenten des Verschlusssystems		X 	1		X
Ermittlung des Implementierungsstandes mathematischer Prozessbeschreibungen anhand prototypischer Beispiele mit Hilfe exemplarischer Nachweisführungen unter Berücksichtigung maßgeblicher Bemessungssituationen und Einwirkungskombinationen		X			X
Feststellung des Validierungsstatus der eingesetzten Simulationswerkzeuge		X	X	X	
Ermittlung von Defiziten der Simulationswerkzeuge und Aufzeigen von notwendigen Schritten zur Beseitigung der Defizite					X
Schrittweise Beseitigung der Defizite der Simulationswerkzeuge, Verifizierung und Validierung		X	X	X	X
Tongestein Entwicklung eines vollumfänglichen Computerprogramms, das ein TH2M-gekoppeltes System inklusive der queldruckbasierten Veränderung der Permeabilität von tonbasierten Materialien simulieren kann				X	X

Simulationswerkzeuge zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des geotechnischen Barriersystems sind in ihren Grundfunktionen vorhanden. Allerdings ist der Entwicklungsstand für verschiedene Stoffmodelle und Rechenmodelle in den einzelnen Simulationswerkzeugen historisch bedingt sehr unterschiedlich.

 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 14:57:57 +01'00'

Zu früh, zu ambitioniert?

Neben den Simulationswerkzeugen ist auch die Modellierungsstrategie von Bedeutung. Aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes einzelner Simulationswerkzeuge sowie der unterschiedlichen Skalenebenen wurde bisher die Submodelltechnik (z. B. Müller-Hoeppe et al. 2012a) erfolgreich eingesetzt und über ausgewählte Schnittstellen eine Kopplung realisiert. Deshalb ist im ersten Schritt eine Festlegung zur Modellierungsstrategie erforderlich. In einem weiteren Schritt ist der Grad der Kopplung von Einzelprozessen (stark/schwach - einseitig/zweiseitig) zu bestimmen sowie eine Vorgehensweise zum Umgang mit Up- und Downscaling Prozeduren (Müller et al. 2016). Erst daran kann sich die Auswahl präferierter Simulationswerkzeuge anschließen und diese für die Fragestellung weiterentwickelt werden.

Steinsalz:

Aufgrund der Vielzahl möglicher Randbedingungen und Kombinationsmöglichkeiten von Verschlusselementen ist es zielführend, eine Vorgehensweise zu entwickeln, um Defizite und Lücken in den Simulationswerkzeugen zu identifizieren und zu beseitigen. Nach Entscheidung über die Modellierungsstrategie, sind anhand prototypischer Beispiele für Funktionselemente maßgebliche Kopplungen zu identifizieren und der Stand der mathematischen Beschreibung der Prozesse zu prüfen. Die prototypischen Beispiele erlauben exemplarische Nachweisführungen unter Berücksichtigung der o.g. Bemessungssituationen und der aus den FEP abgeleiteten Einwirkungen und Einwirkungskombinationen vorzunehmen. Anhand dieser Beispiele werden die Grenzen der Simulationswerkzeuge offensichtlich. Weiterhin ist der Validierungsstatus der Simulationswerkzeuge von so hoher Bedeutung, so dass davon ausgegangen werden muss, dass prototypische Großversuche erforderlich sind, um die Simulationswerkzeuge zu qualifizieren. Auf Erfahrungen aus Simulationen von Funktionselementen im ERAM und der Schachanlage Asse II kann zurückgegriffen werden, da für sie prototypische Bauwerke vorhanden sind. Auch wenn diese Informationen erst spät benötigt werden, wird empfohlen, mit den Arbeiten frühzeitig zu beginnen, da nach bisheriger Erfahrung die notwendigen Schritte – Erkennen eines Prozesses, seine mathematische Formulierung, seine systematische versuchstechnische Untersetzung zwecks Überprüfung, seine Implementierung in ein Simulationswerkzeug und die Verifizierung und Validierung der Implementierung - ein sehr komplexer und zeitaufwendiger Prozess sind. Insbesondere hinsichtlich der versuchstechnischen Untersetzung ist festzustellen, dass insbesondere zur Parametrisierung und Validierung des Langzeitverhaltens eine adäquate Anzahl von Langzeitversuche fehlt, die große Vorlaufzeiten erfordern.

Die Begutachtung der Unterlagen zu Abdichtbauwerken und Schachtverschlüssen im ERAM erfolgt derzeit. Im Rahmen der Begutachtung aufgeworfene Fragestellungen sollten ebenfalls auf Ihre FuE-Relevanz geprüft werden.

Tongestein:

Derzeit existiert noch kein validiertes und damit einsatzfähiges Computerprogramm, das ein TH2M-gekoppeltes System inklusive der queldruckbasierten Veränderung der Permeabilität von tonbasierten Materialien verlässlich simulieren kann. Entsprechende Berechnungen wären notwendig, um die Entwicklung der Eigenschaften von tonbasierten Dichtelementen und quellfähigem Versatz innerhalb der transienten Phase belastbar prognostizieren zu können. Ein solches Programm wäre in der Lage, die Lastentwicklung

auf die unterschiedlichen Barrieretypen in seiner zeitlichen Entwicklung zu berechnen. Damit ließen sich die strömungstechnischen Prozesse innerhalb des Dichtsystems in der transienten Phase realitätsnäher abbilden und auch die Dauer bis zum Erreichen der endgültigen hydraulischen Eigenschaften des Dichtsystems könnte konkretisiert werden.

Kristallingestein:

Nach derzeitiger Kenntnis existieren verschiedene Computerprogramme, mit denen Lösungs- und Gasbewegungen im versetzten und verschlossenen Grubengebäude und damit verbunden eine entsprechende Fluidruckentwicklung simuliert werden können. Dies schließt die unterschiedlichen Antriebsmechanismen, die zu einer Fluidbewegung führen können, ein. Antriebsmechanismen können sein: Temperaturunterschiede, Druckunterschiede, Dichteunterschiede, Kapillarkräfte. Derzeit findet das Computerprogramm TOUGH2 vielfach Anwendung, da es thermodynamische Daten verschiedener Gase und Flüssigkeiten in verschiedenen Programmmodulen bereitstellt (Pruess et al. 2012). Der Nachteil dieses Programms ist die fehlende Kopplung zur mechanischen Prozessklasse.



Eine solche Kopplung wurde in den letzten Jahren durch die Verbindung mit dem kommerziellen Computerprogramm FLAC3D realisiert (Itasca 2005). Diese TOUGH2-FLAC3D-Kopplung funktioniert auf Zeitschritzebene, das heißt, die thermo-hydraulische und die mechanische Prozessklasse werden nacheinander abgearbeitet, wofür eine ausreichend kleine Zeitschrittweite Bedingung ist (Hou et al. 2014).

Einen anderen Weg geht das Programmsystem OpenGeoSys (OGS). Hier werden alle Prozessklassen auf Differentialgleichungsebene gekoppelt, was deutlich effektiver ist (Kolditz et al. 2012).

Beide Programmsysteme (TOUGH2-FLAC3D und OpenGeoSys) sind derzeit Teil eines europäischen Benchmarkprojektes mit der Kurzbezeichnung BenVaSim, das sich über drei Jahre vom Mai 2017 bis August 2020 erstreckt. Das Ziel des Forschungsprojekts BenVaSim ist, einen internationalen Vergleich von TH2M-Simulatoren (Temperatur, Zweiphasenfluss und Geomechanik) durchzuführen.

Zur Durchführung hydrochemischer Berechnungen findet das Programmsystem PHREEQC derzeit weitverbreitete Anwendung. Es wird vom US Geological Survey (USGS) betreut. Ausgestattet mit einer großen thermodynamischen Datenbank erlaubt es zudem die Berechnung einer Vielzahl chemischer Reaktionen. Neben PHREEQC sind auch die Programme WATEQ4F und MINTEQ im Bereich der Hydrochemie international bewährte Tools zur Durchführung von Berechnungen.

2.4.4 Radiologische Konsequenzenanalyse

Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) ist in Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen das Ziel aller Sicherheitskonzepte für die verschiedenen Wirtsgesteine. Der sichere Einschluss ist dann gegeben, wenn es allenfalls zu Freisetzungen von Radionukliden aus dem ewG kommt, die im Hinblick auf ihre radiologischen Auswirkungen als geringfügig einzustufen sind.

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 15:00:16 +01'00'

Die nachfolgenden Ausführungen sind - ebenso wie die Anwendungsgebiete der genannten Codes - m. E. allgemeiner Natur und nicht spezifisch für Kristallingestein.

Ein noch besseres Einschlussvermögen ist beim vollständigen Einschluss der Radionuklide gegeben, bei dem überhaupt keine Radionuklide aus dem ewG oder ewB freigesetzt werden.

Die Bewertung des Einschlussvermögens des ewG und des ewB für die Radionuklide der radioaktiven Abfälle ist deshalb eines der zentralen Elemente der Eignungsprognose für einen Standort. Diese Bewertung erfolgt anhand einer Betrachtung der potenziellen Freisetzungen der Radionuklide über den Lösungspfad und über den Gaspfad für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien. Für alle diese Freisetzungen wird eine radiologische Konsequenzenanalyse durchgeführt. Zur Bewertung des Einschlussvermögens bietet sich der vereinfachte Nachweis für die radiologische Langzeitaussage gemäß Kap. 7.2.2 aus BMU (2010) an, bei dem die potenzielle Freisetzung von Radionukliden am Rand des ewG betrachtet wird. Es ist dabei rechnerisch zu zeigen, dass die Freisetzungen am Rand des ewG unter Berücksichtigung eines konservativen generischen Expositionsmodells bei wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien die zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten. Allerdings ist die gemäß BMU (2010) vorgegebene Berechnung einer Verdünnung auf Trinkwasserqualität nicht eindeutig, insbesondere bei diffusiven Freisetzungen aus dem ewG.

2.4.4.1 Migrationsprozesse von Lösungen und Gasen

Tabelle 28: Forschungsbedarf Migrationsprozesse von Lösungen und Gasen.

Kapitel 2.4.4.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz Migrationsprozesse auf Kontaktzonen. Entwicklung reproduzierbarer Versuchstechniken bei realitätsnaher Abbildung der in situ-Bedingungen				X	X
Untersuchung der Relevanz des Gaspfades bei trockenem Endlager.		X			X
Untersuchung der druckgetriebenen Infiltration von Kohlenwasserstoffen in Salzgestein					X
Tongestein Migrationsprozesse von Gasen im dichten Tongestein inklusive der zeitliche Entwicklung des Gaseindringdrucks		X	X	X	X
Modell der Porenaufweitung als alternatives Modell zur Zwei-Phasen-Strömung zur Beschreibung der Gas-Migration			X	X	X
Prognose der zeitlichen Entwicklung des Systems aus Streckenversatz und Streckenausbau im Hinblick auf die zu erwartenden Porosität, Permeabilität und 2-Phasen-Parametern			X	X	X
Kristallingestein Permeabilitätsentwicklung von Klüften im Gesteinsbereich mit erhöhter Temperatur und damit der Störung des thermischen Gleichgewichtes					X
Migrationsprozesse von Lösungen und Gasen in tonbasierten Streckenversatz- und Abdichtsystemen während der transienten Phase					X

Ziel des radiologischen Nachweises ist, zu zeigen, dass eventuelle Freisetzungen am Rand des ewG oder ewB unterhalb der Geringfügigkeitsgrenze liegen. Dieser Nachweis wird rechnerisch über die Bewertung advektiver und diffusiver Radionuklidausbreitungen geführt.

Die Strömung von Lösungen bewirkt auch einen Transport von gelösten Stoffen in der flüssigen Phase, sowie von Gaskomponenten in der Gasphase mit der Strömung des Transportmediums (Wasser oder Gas). Dieser Transportprozess wird als Advektion bezeichnet. Der gelöste Stoff wird bei der Advektion mit der Geschwindigkeit des Transportmediums bewegt (Lege et al. 1996). Der Antriebsmechanismus für Strömungsprozesse sind Gradienten im Fluiddruck. Diese können durch den aufgeprägten lokalen Fluiddruck, Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Fluiden (Auftrieb) oder innerhalb eines Fluids (Konvektion) hervorgerufen werden. Fluiddruckunterschiede können von der festen Phase auf Fluide aufgeprägt werden. Dies geschieht zum Beispiel bei Prozessen, die das Volumen der Festphase ändern (z. B. Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen). Weiterhin können Prozesse, die die Menge bzw. das Volumen der flüssigen oder gasförmigen Phase verändern Fluiddruckunterschiede bewirken. Werden in einem Medium Fluide in unterschiedlichen Phasen, z. B. Lösungen und Korrosionsgase, bewegt, spricht man von Mehrphasenströmung. Treten im Porenraum mehrere Phasen auf, werden die Permeabilitäten für die einzelnen Phasen verringert (effektive Permeabilitäten).

Da in allen Teilsystemen in jedem Fall von Konzentrationsunterschieden gelöster oder gasförmiger Stoffe auszugehen ist, werden in jedem Fall neben advektiven auch diffusive Transportprozesse stattfinden. Gasförmige Radionuklide und radioaktive Aerosole können durch Advektion, durch Dispersion als Begleiterscheinung des advektiven Transportes und durch Diffusion in der Gasphase als Folge von Konzentrationsunterschieden transportiert werden.

Informationsbedarf besteht hinsichtlich der hydraulischen Verhältnisse im Wirtsgestein, insbesondere innerhalb des Störungs- und Kluftsystems, sowie hinsichtlich der Rückhalteigenschaften innerhalb des Kluft- und Matrixsystems.

Steinsalz:

FuE-Bedarf besteht zu Migrationsprozessen auf Kontaktzonen sowie zu Diffusionsprozessen in Baustoffen. Hierzu sind im ersten Schritt reproduzierbare Versuchstechniken zu entwickeln, die die in situ-herrschenden Randbedingungen realitätsnah abbilden, um das vorhandene Prozessverständnis über reproduzierbare Versuche abzusichern. Untersuchungsbedarf besteht zum Gaspfad (radioaktive Gase) bei trockenem Endlager (Notwendigkeit prüfen). Experimentelle Untersuchungen der druckgetriebenen Infiltration von Kohlenwasserstoffen in das Salzgestein werden als notwendig erachtet.

Tongestein:

Generell sind derzeit Migrationsprozesse von Gasen im dichten Tongestein noch nicht vollständig verstanden. Unklar in dem Zusammenhang ist beispielsweise auch die Größe und zeitliche Entwicklung des Gaseindringdrucks. Auch ist nicht klar, ob damit zu rechnen ist, dass eine freie Gasphase in einem solchen Umfang auftritt, dass Transport-

prozesse im Wirtsgestein überhaupt stattfinden und ggf. auch Eigenschaften des Wirtsgesteins beeinflussen. Hinsichtlich des Gastransportes ist derzeit unklar, welches der beiden Modelle, Zwei-Phasen-Fluss oder Porenaufweitung, die Realität besser abbildet.

In jedem Fall fehlt noch eine Prognose der zeitlichen Entwicklung des Systems aus Streckenversatz und Streckenausbau im Hinblick auf die zu erwartenden Werte der Modellparameter Porosität, Permeabilität und 2-Phasen-Parametern als Grundlage für rechnerische Analysen. In dem Zusammenhang ist auch zu klären, ob die Auflösung von Materialien mit Zementphasen, wie z. B. der Streckenausbau und Widerlager, eventuell Dichteunterschiede in der Lösung hervorrufen, die advektive Strömungen im Strecken- und Schachtsystem zur Folge haben.

Kristallingestein:

Kenntnisdefizite bestehen hinsichtlich der Permeabilitätsentwicklung von Klüften im Gesteinsbereich mit erhöhter Temperatur und damit der Störung des thermochemischen Gleichgewichtes, was zu Lösungs- und Ausfällungserscheinungen führen kann. Für den Fall der Einlagerung im Kristallin kommt dem technischen und geotechnischen Barriersystem eine besondere Bedeutung zu, da das Einschusspotenzial dieses Wirtsgestein aufgrund von Kluftsystemen räumlich limitiert ist. Für diesen Fall fehlt noch eine Prognose der zeitlichen Entwicklung des Systems aus Streckenversatz und Abdichtbauwerken im Hinblick auf die zu erwartenden Werte der Modellparameter Porosität, Permeabilität und 2-Phasen-Parametern während der transienten Phase als Grundlage für rechnerische Analysen.

2.4.4.2 Mobilisierung, Transport und Rückhaltung von Radionukliden

Table 29: Forschungsbedarf Mobilisierung, Transport und Rückhaltevermögen von Radionukliden.

Kapitel 2.4.4.2 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Steinsalz Versagensszenarien für Endlagerbehälter unter Berücksichtigung der Kompatibilität mit Rückholungsanforderungen sind zu entwickeln und ihr zeitliches Auftreten einzuschätzen.					X
Auswertung der Eigenschaften von Ton-salz.					X
Untersuchung der potenziellen Sorptionsfähigkeit von Salzgrus-Ton-Gemischen gegenüber langzeitrelevanten Radionukliden.					X
Tongestein/Kristallin Raten einer Radionuklid-Mobilisierung aus CSD-C Abfällen und den Strukturteilen aus der Wiederaufarbeitung und Brennelementkonditionierung		X	X	X	
Untersuchungen zum Einfluss mikrobieller Korrosionsprozesse auf die Behälterstandzeit		X	X	X	X
Untersuchungen zum Lösungs- und Gas-transport in der transienten Phase im ungesättigten Versatz					X

Kapitel 2.4.4.2 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Er- kundung Repräsen- tative vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Übertägige Er- kundung Weiterführende vorläufige Si- cherheitsunter- suchungen	Untertägige Er- kundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsunter- suchungen	
Bestimmung fehlender elementspezifischer Diffusionskoeffizienten					X
Einfluss der Temperatur auf die Komplexbildung unter salinaren Lösungsbedingungen					X
Weiterentwicklung von Oberflächenkomplexmodellen zur Beschreibung der Sorption in natürlichen Systemen (z. B. zur Absicherung von Kd-Werten)					X

Gemäß BMU 2010 ist der Einschluss der Radionuklide in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich für wahrscheinliche Szenarien zu gewährleisten. Für weniger wahrscheinliche Szenarien dürfen aus dem ewG allenfalls geringfügige Mengen an Radionukliden freigesetzt werden. Dies bedeutet, dass das Endlagersystem auch im Falle von wenig wahrscheinlichen Szenarien seine Schutzfunktion erfüllt und sich gegenüber der Freisetzung von Radionukliden als robust erweist. Um diese Robustheit gegenüber potenziellen Freisetzungen in einem Abwägungsprozess bewerten zu können, werden üblicherweise konservative Annahmen und Freisetzungsszenarien getroffen.

Steinsalz:

FuE-Bedarf besteht zu den Versagensszenarien für die Endlagerbehälter und ihr zeitliches Auftreten. Hierbei ist insbesondere die Kompatibilität zwischen den Anforderungen, die aus der Rückholung resultieren und den Versagensszenarien zu beachten. Bei Szenarien, die die Behälterkorrosion beinhalten, ist eine Sorption an den Korrosionsprodukten einzubeziehen.

Bentonit-Beimischungen verbessern möglicherweise die Einschlussfunktion des Salzgrusversatzes. Vor diesem Hintergrund sollten die Eigenschaften von Tonsalz als natürliches Analogon ausgewertet werden und gezielte Untersuchungen zur Sorptionsfähigkeit dieser Gemische stattfinden.

Tongestein/Kristallingestein:

Hinsichtlich des Quellterms bestehen Kenntnisdefizite bei der Quantifizierung der "Instant Release Fraction" für die dosisrelevanten Radionuklide, insbesondere I-129. Zu diesem Thema wurde Anfang 2015 der Abschlussbericht des europäischen Forschungsprojekts „First Nuclides“ veröffentlicht (Kienzler et al. 2012b). Die Ergebnisse dieses Projekts müssen zuerst im Hinblick auf die langzeitsicherheitsanalytische Relevanz überprüft werden, bevor weiterer Forschungsbedarf spezifiziert werden kann.

Bezüglich der Mobilisierung sind derzeit die Raten der Radionuklid-Mobilisierung aus CSD-C Abfällen und den Strukturteilen aus der Wiederaufarbeitung und Brennelementkonditionierung nicht bekannt. Auch nicht bekannt ist der Einfluss hoher Abbrände auf die Größe der "Instant Release Fraction".

Ob ein advektiv-dispersiver Transport von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen stattfindet, hängt davon ab, ob Endlagerbehälter ausgefallen sind und sich ein

durchgängiger Lösungspfad im Grubengebäude gebildet hat, so dass die Antriebsmechanismen für eine Strömung wirken können. D. h., es ist zunächst wichtig, die Behälterlebensdauer unter den jeweiligen Standortbedingungen bzw. dem jeweiligen hydrochemischen Milieu zu bestimmen. In dem Zusammenhang ist der Einfluss von Mikroben auf die Korrosion der Behälter zur besseren Quantifizierung der Behälterlebensdauer und damit dem Beginn einer Freisetzung noch wenig untersucht.

Parallel dazu ist zu ermitteln, ab wann sich im Zuge der Aufsättigung ein durchgehender Lösungspfad im versetzten Grubengebäude bilden kann, so dass ein advektiver Transport beginnen kann. Ebenfalls unklar ist, welchen Einfluss die Lösungsströme zur Aufsättigung des Versatzes auf den Radionuklidtransport haben und inwieweit in dem teilgesättigten Versatz bereits ein Radionuklidtransport in Lösung stattfindet.

Ob, und wenn ja, bis wohin ein Transport gasförmiger Radionuklide erfolgt, ist für ein Endlager im Kristallin derzeit noch unklar. Prinzipiell können Radionuklide über den Gaspfad aus dem Endlager, vornehmlich über Kluftsysteme, entweichen und in die Biosphäre gelangen. Die daraus möglichen resultierenden Strahlenexpositionen sind in dem Zusammenhang unklar. Um Abschätzungen über den Transport machen zu können, ist es wichtig, die chemische Form, in der C-14 vorliegt zu bestimmen. Darüber hinaus ist die Relevanz der Sorption für Radionuklide in der Gasphase nicht geklärt.

Zur detaillierten Berechnung des Radionuklidtransports durch Diffusion fehlen derzeit noch verschiedene elementspezifische Diffusionskoeffizienten für das jeweilige Wirtsgestein, den Versatz und die Barrieren.


Für den Prozess der Sorption und Desorption ist das Sorptionsverhalten einiger Radionuklide bzw. der Elemente und deren anionischen und kationischen Verbindungen (z. B. Iod) noch nicht ausreichend geklärt. Dies gilt auch für die Sorption von Radionukliden an Materialien mit Zementphasen sowie an in situ relevanten Produkten der Korrosion von Zementphasen und Metallen.

Kolloidbildung und -transport können zum Masseverlust der Tonfraktion der Verschlussbauwerke führen. Dieser Prozess kann wegen fehlender Daten zu Strömungsvorgängen im Grubengebäude derzeit noch nicht quantifiziert werden. Bei Fließraten deutlich unter etwa 10^{-7} m/s (Baik et al. 2007) kann ein vernachlässigbarer Einfluss dieses Prozesses auf die Funktion von Verschlussbauwerken und Versatzes erwartet werden. Eine Bewertung des Masseverlustes mit dem Abtransport durch Kolloide für die Auslegung von Verschlussbauwerken liegt bisher nicht vor. Generell fehlen Informationen zu Bildung, Transport und Filtration von Bentonitkolloiden unter zu erwartenden In situ-Bedingungen.

Im Zusammenhang mit der Komplexbildung bestehen u. a. Kenntnisdefizite hinsichtlich des Einflusses der Temperatur auf die Komplexbildung unter salinaren Lösungsbedingungen. Darüber hinaus wäre eine Weiterentwicklung von Oberflächenkomplexmodellen zur Beschreibung der Sorption in natürlichen Systemen hilfreich, um z. B. eine Absicherung von Kd-Werten (Rückhalteparameter im Stoffmodell) und deren Bandbreiten als Grundlage von Berechnungen zu erzeugen.

2.4.4.3 Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffgesetze)

Tabelle 30: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffgesetze).

Kapitel 2.4.4.3 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teil- gebieten	Ermittlung von SR für über- tägige Erkun- dung Repräsentative vorläufige Si- cherheitsunter- suchungen	Übertägige Er- kundung Weiterführende vorläufige Si- cherheitsunter- suchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsunter- suchungen	
Steinsalz Parametrisierung von Diffusionsmodellen und Ermittlung ihrer Anwendungsgrenzen.		X		X	X
Parametrisierung von 2Phasenflussmodellen und Ermittlung ihrer Anwendungsgrenzen.		X		X	X
Bei Relevanz versuchsweise Anwendung der Modelle zum Gastransport		X			X
Sichtung von Modellen zur Beschreibung des Migrationsverhaltens auf Kontaktzonen		X		X	X
Tongestein/Kristallingestein Modelle für die Radionuklid-Mobilisierung aus Brennelementen von Forschungsreaktoren				X	X
Entwicklung eines Stoffmodells zur Simulation des Prozesses der Porenaufweitung im Tongestein und tonbasierten Dichtelelementen					X
Entwicklung eines Stoffmodells zur Berücksichtigung der Redoxbedingungen bei der Sorptionsberechnung					X


Ziel der mathematischen Abbildung der Prozesse ist es, die beschriebenen Mobilisierungs-, Transport- und Rückhalteprozesse in geeigneter Weise mathematisch zu beschreiben, so dass diese simuliert und darauf basierend rechnerische Nachweise geführt werden können. Für jeden der beschriebenen Prozesse bedarf es eines Stoffmodells, auf dessen Basis eine entsprechende Simulation erfolgen kann.

Steinsalz:

FuE-Bedarf besteht zur Parametrisierung der Modelle, die Diffusionsprozesse beschreiben, sowie zu potenziellen Anwendungsgrenzen der Modelle. Die Ermittlung der Parameter kann jedoch sinnvoll erst nach der Entwicklung von Versuchstechniken durchgeführt werden, die die in situ-herrschenden Randbedingungen realitätsnah abbilden. Dies gilt ebenfalls für die Ermittlung der Zweiphasenflussparameter. Wenn sich der Gaspfad (radioaktive Gase) bei trockenem Endlager als relevant erweist, können vorhandene Modelle zum Gastransport versuchsweise angewendet werden. Vorhandene Modelle zum Gaspfad bei gleichzeitigem Vorhandensein von Lösung (Zweiphasenflussmodelle) sind zu parametrisieren. Dazu ist die Ermittlung der Zweiphasenflussparameter notwendig. Es sollten Modelle gesichtet und zusammengestellt werden, die möglicherweise sinnvoll für Kontaktzonen zur Anwendung kommen können.

Tongestein/Kristallingestein:

Modelle für die Mobilisierung aus Brennelementen von Forschungsreaktoren stehen noch nicht zur Verfügung. Um einen eventuellen Gastransport durch das Wirtsgestein mathematisch abbilden zu können, fehlen einsatzreife mechanistische Stoffmodelle be-

 Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 15:03:19 +01'00'
Zu früh, zu ambitioniert zu diesem Zeitpunkt? (Anmerkung gilt für alle vier Einträge in dieser Spalte).

züglich des Modells der Porenaufweitung, die eine belastbare Prozessmodellierung erlauben. In Bezug auf Rückhalteprozesse ist bekannt, dass speziell die Redoxbedingungen große Auswirkungen auf die Sorption redoxsensitiver Radionuklide haben. Für diesen Prozess existiert aber noch kein Stoffmodell, das in Simulationen verwendet werden kann.

2.4.4.4 Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise

Tabelle 31: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise.

Kapitel 2.4.4.4 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<u>Steinsalz</u> Ermittlung von Modellannahmen und konservativen Annahmen in Simulationswerkzeugen zur Konsequenzenanalyse		X			
Anwendungsbezogene Validierung von 2-Phasenfluss-Simulationswerkzeugen.		X		X	X
Anwendungsbezogene Validierung von Simulationswerkzeugen zum reaktiven Transport.		X		X	X
<u>Tongestein</u> Entwicklung eines Rechenprogramms zur Modellierung des gekoppelten, gleichzeitigen Radionuklidtransports in der flüssigen Phase und in der Gasphase im gesamten Endlagersystem					X
Weiterentwicklung des Smart Kd-Konzeptes					X
<u>Kristallingestein</u> Erweiterung und Verifikation vorhandener Rechenprogramme zur Modellierung des gekoppelten, gleichzeitigen Radionuklidtransports in der flüssigen Phase und in der Gasphase im gesamten Endlagersystem					X

Der Transport der Radionuklide vom Einlagerungsort zum Rand eines ewG kann entlang von zwei möglichen, deutlich unterscheidbaren Transportpfaden erfolgen. Dies ist zum einen der Transport durch das vom Bergwerk unbeeinflusste Wirtsgestein und zum anderen jener entlang der zur Auffahrung des Endlagers errichteten Strecken und Schächte. Im Gegensatz zu Salz- und Tongesteinen handelt es sich bei Kristallingesteinen um ein geklüftetes Wirtsgestein, dessen natürliches Trennflächengefüge potenzielle Transportwege für Radionuklide darstellen. Für die durchzuführenden Sicherheitsanalysen wird insbesondere im Kristallin die gesamtheitliche Betrachtung der Transportpfade Wirtsgestein und Endlagerbergwerk als wichtig erachtet. Ob eine getrennte Betrachtung der radiologischen Ausbreitungspfade von Wirtsgestein und Endlagerbergwerk, wie es in Salzgesteinen und teilweise im Tongestein für erste orientierende Sicherheitsanalysen durchgeführt wird, möglich ist, ist Gegenstand der Forschung und Entwicklung. Der Transport der Radionuklide kann im Endlager sowohl in gelöster, als auch in gasförmiger Form im Gesamtsystem aus Wirtsgestein und Strecken und Schächten stattfinden. Unter anderem sind Fragen zum Mechanismus des Gastransportes in den hoch kompaktierten Bentoniten des Verschlussystems und Wechselwirkungen zum

Gastransport zwischen Wirtsgestein und Endlagerbergwerk zu untersuchen. Ein erstes Ziel ist es daher, die Funktionsfähigkeit und Anwendbarkeit vorhandener Simulationswerkzeuge hinsichtlich der Problemstellungen zu testen und entsprechend anzupassen.

Steinsalz:

Für die Simulationswerkzeuge zur Konsequenzenanalyse besteht – sofern sie für die Standortsuche eingesetzt werden – die Notwendigkeiten die Modellannahmen und konservativen Ansätze, die in ihnen enthalten sind, offenzulegen. Festzustellen ist weiterhin der Stand ihrer Verifikation durch Vergleichsberechnungen. Dabei sind insbesondere diffusive Prozesse zu betrachten.

Simulationswerkzeuge, die zur Modellierung von Zweiphasenflusseffekten zum Einsatz kommen, sind zu validieren. Hierzu sind Ansätze zu entwickeln, die sich auf die behandelten Fragestellungen beziehen. Dies gilt in gleicher Weise für die Simulationswerkzeuge zum reaktiven Transport.

Tongestein:

Für den radiologischen Nachweis fehlt derzeit ein Rechenprogramm zur Modellierung des gekoppelten, gleichzeitigen Radionuklidtransports in der flüssigen Phase und in der Gasphase im gesamten Endlagersystem. Der entsprechende Entwicklungsbedarf kann allerdings erst dann zufriedenstellend abgedeckt werden, wenn ein klares Verständnis über die Art und Weise der Migration von Gasen im Tongestein vorliegt, was derzeit nicht der Fall ist. Ist das Verständnis hergestellt, ist ein entsprechendes mathematisches Modell zu entwickeln, mit dem der Transportprozess adäquat beschrieben werden kann. Für den radiologischen Nachweis befindet sich derzeit das Rechenprogramm NaTREND in Entwicklung, mit dem der Gas- und Lösungstransport zumindest im Grubengebäude modelliert werden kann. Dieses Rechenprogramm stand beispielsweise im Rahmen des Projektes ANSICHT noch nicht zur Verfügung.

In Bezug auf die Simulation von Rückhalteeffekten wären für das Smart-Kd-Konzept weitere Testberechnungen notwendig, um den modifizierten Transportcode zu qualifizieren. In einfachen wie auch komplexeren Modellrechnungen ist die Anwendbarkeit des Modells für weitere Variationen der geochemischen Einflussgrößen, der Modellgeometrie, der Heterogenität und der Komplexität der Strömung zu zeigen. In dem genannten Code können derzeit Redoxreaktionen und Ionenaustausch noch nicht berücksichtigt werden. Zudem sollte der Einfluss weiterer Konkurrenzionen und Komplexbildner auf die Radionuklidsorption im Detail untersucht und mit dem hier beschriebenen Ansatz simuliert werden. Schließlich sollte auch die Anwendung des Konzepts auf hochsalinare Bedingungen, wie sie in den tieferen Tonsteinformationen in Norddeutschland anzutreffen sind, getestet werden.

Kristallingestein:

Für den radiologischen Nachweis ist prinzipiell sowohl für den Lösungs- als auch für den Gaspfad eine integrierte Modellierung des Radionuklidtransportes im gesamten Endlagersystem, d.h. Wirtsgestein und Endlagerbergwerk notwendig. Ein solches Berechnungswerkzeug steht derzeit nicht zur Verfügung. Inwiefern die bestehenden für Salz- und Tongestein entwickelten Programme zur Radionuklidmigration im Hinblick auf eine

Nutzung im Kristallingestein anwendbar sind und ob aufgrund von Programmlimitierungen eine damit verbundene getrennte Betrachtung des Ausbreitungspfades oder des Transportpfades zielführend ist, ist Gegenstand der Forschung und Entwicklung. Im Rahmen des Projektes CHRISTA-II erfolgt eine Konzeption und beispielhafte Berechnung radiologischer Sicherheitsindikatoren. Die Arbeiten beinhalten auch eine Anpassung vorhandener Berechnungstools im Hinblick einer Nutzung im Kristallin und unter Berücksichtigung der Sicherheitskonzepte. Aus jetziger Sicht werden die Ergebnisse Mitte 2020 vorliegen. Des Weiteren werden im Zuge der deutsch-russischen wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit die in URSEL begonnenen Transportmodellierungen im Rahmen des FuE-Projektes SUSE fortgeführt und durch komplexere geologische Modellannahmen zum Kluftsystem ausgebaut. Zunächst sollen Daten zur geometrischen Charakterisierung des Kluftsystems festgelegt und in ein sog. DFN-Modell (Discrete Fracture Network) überführt werden. Darauf aufbauend sollen regionale kontinuumsmechanische Modelle zur Radionuklidmigration erstellt werden, die die struktureologischen Basisdaten möglichst realitätsnah abbilden. Aus jetziger Sicht werden die Ergebnisse Mitte 2020 vorliegen.

2.4.5 Kritikalitätsausschluss

Table 32: Forschungsbedarf Kritikalitätsausschluss.

Kapitel 2.4.5 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsunter- suchungen	Übertägige Erkundung Weiterfüh- rende vorläu- fige Sicher- heitsunter- suchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsun- tersuchun- gen	
Untersuchungen zur Kritikalität bzgl. der Behälterkonzepte für die Wirtsgesteine Tongestein und Kristallin.					X
Untersuchung zur Kritikalität an den ausgewählten Endlagerstandorten unter Berücksichtigung der Lösungszusammensetzungen			X	X	

Bei direkter Endlagerung von ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren, den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie den Forschungsreaktoren ist zu berücksichtigen, dass sich auch im abgebrannten Zustand nach wie vor nicht vernachlässigbare Mengen an spaltbaren Nukliden im Brennstoff befinden. Deshalb ist gemäß Abschnitt 7.2.4 der Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010) nach Stand von Wissenschaft und Technik nachzuweisen, dass die Sicherstellung der Unterkritikalität sowohl in der Betriebs- als auch in der Nachbetriebsphase des Endlagers während des gesamten Betrachtungszeitraumes gewährleistet ist. Aus diesem Grund sind für alle ausgedienten Brennelemente Kritikalitätsuntersuchungen durchzuführen.

Untersuchungen der Kritikalität sind für jede Art von Brennelement in den dafür vorgesehenen Behältern durchzuführen. Da ein Wasserzutritt in den Behältern bei diesen Un-

tersuchungen unterstellt wird, sind die Lösungszusammensetzungen am jeweiligen Endlagerstandort zu berücksichtigen. Daher empfiehlt es sich in jeder Phase der Sicherheitsuntersuchungen Kritikalitätsberechnungen durchzuführen.

2.4.6 Safeguards

Table 33: Forschungsbedarf Safeguards.

Kapitel 4.6 Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teil- gebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsen- tative vorläu- fige Sicher- heitsuntersu- chungen	Übertägige Erkundung Weiterfüh- rende vorläu- fige Sicher- heitsuntersu- chungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Si- cherheitsun- tersuchungen	
Entwicklung eines aktuellen Safeguards-Konzeptes auf Basis der aktualisierten Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallin unter Berücksichtigung der Richtlinien von EURATOM und IAEA.				X	
Entwicklung eines Safeguardskonzept für die Rückholung in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein und Integration in das Safeguards-Konzept					X

Die Maßnahmen zur Safeguardsüberwachung werden zwischen den Ländern, EURATOM und IAEA vertraglich für jede Anlage ausgehandelt. Für ein potenzielles Endlager in Deutschland existiert derzeit noch kein solches Abkommen. Da die Safeguardsmaßnahmen die betrieblichen Aspekte und auch das Endlagerkonzept die Safeguardsmaßnahmen berücksichtigen müssen, sollte mit der Planung zur Implementierung der Maßnahmen so früh wie möglich begonnen werden. Außerdem muss geprüft werden, ob die geplanten Safeguardsmaßnahmen ausreichend sind. Aus diesem Grund sollte spätestens bei § 18 StandAG (Untertägige Erkundung) das Safeguardskonzept berücksichtigt und stetig unter Einbeziehung von EURATOM und IAEA aktualisiert werden.

Bei der Rückholung und ggf. Bergung der Abfälle ist zu berücksichtigen, dass auch dann noch eine Safeguardsüberwachung nötig sein kann. Ein Konzept hierfür ist zu entwickeln. Darüber hinaus kann es dazu kommen, dass dieses Konzept auch Auswirkungen auf das Safeguardskonzept der Einlagerung hat, da z. B. die Brennstabkockille nur im Bohrloch unter Tage oder in einer heißen Zelle über Tage verifiziert werden kann, da sie aufgrund der fehlenden Abschirmung in einem Transferbehälter transportiert wird. Dies könnte dazu führen, dass der Materialfluss sowohl beim Konzept für die Einlagerung als auch bei der Rückholung auch unter Tage bilanziert werden muss. Daher muss nach Entwicklung des Safeguardskonzeptes für die Rückholung über etwaige Anpassungen für das Safeguardskonzept für die Einlagerung entschieden werden.

2.5 Sozialwissenschaften

Für die Umsetzung einer nachhaltigen und nachvollziehbaren FuE-Planung, die der Aufgabenwahrnehmung als Vorhabenträgerin in der Standortsuche dient, bedarf es einer Strategie, die unterschiedliche Themenfelder und deren Wechselwirkungen aus ver-

schiedenen Perspektiven beleuchtet. Dazu zählen neben den wissenschaftlich-technische Aspekten auch gesellschaftliche Herausforderungen im Bereich der Endlagerung. Zu diesem Zweck wird die BGE FuE-Projekte sowie Studien mit gesellschaftlichen Schwerpunkten initiieren, durchführen und fortschreiben.

2.5.1 Transparenz und Ergebnis-/Wissensvermittlung



In Deutschland sind entsorgungspolitische Weichenstellungen mit umwelthistorischen Ereignissen verbunden. Dadurch wurden gesellschaftliche Entwicklungen verstärkt, welche direkte Auswirkungen auf den weiteren Verlauf der Endlagerprojekte hatten.

FuE-Bedarf:

Der Forschungsbedarf kann mit nachfolgenden Fragekomplex skizziert werden:

- Welche Methoden, Instrumente und Vorgehensweisen eignen sich besonders, um einer möglichst breiten interessierten Öffentlichkeit einen informativen Zugang zu den jeweiligen komplexen naturwissenschaftlichen und technischen Ergebnissen des Standortauswahlverfahrens zu ermöglichen? Welche inhaltlichen und organisatorischen „Vertrauensbrücken“ sind vorhanden und welche sind zu schaffen?

Mit den Arbeiten zur Deckung dieses Forschungs- und Entwicklungsbedarfes ist unverzüglich zu beginnen.

2.5.2 Sozioökonomische Potenzialanalysen

Gemäß § 16 Abs. 1 StandAG führt die BGE im Zuge der übertägigen Erkundung und Ermittlung von Vorschlägen zur untertägigen Erkundung sozioökonomische Potenzialanalysen durch, deren Ergebnisse Anhaltspunkte für die zukünftige Kompensation sozioökonomischer Nachteile betroffener Standortregionen liefern können. Die Regionalkonferenzen erhalten gemäß § 10 Abs. 4 StandAG Gelegenheit zur Stellungnahme bei der Erarbeitung sozioökonomischer Potenzialanalysen.

Die Erkundungsprogramme für eine untertägige Erkundung müssen neben Umweltauswirkungen, Nutzungskonflikten, Eingriffen privater Rechte Dritter auch negative sozioökonomischer Auswirkungen im Hinblick auf die beabsichtigte Erkundung minimiert werden (Begründung StandAG).

Im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Abschlussbericht 2016) werden die Untersuchungsgegenstände für den standardisierten Teil der sozioökonomischen Potenzialanalyse aufgeführt und quantitative Schwellenwerte vorgeschlagen, die auf eine positive oder negative Abweichung in Bezug auf eine vorher vereinbarte Vergleichsregion hinweisen.

Generell sind für eine Konkretisierung der Beauftragung von sozioökonomischen Potenzialanalysen klare Vorgaben und Randbedingungen zu wählen, um einerseits eine nachvollziehbare Verwendbarkeit der Ergebnisse und eine Vergleichbarkeit der Analysen untereinander zu ermöglichen und andererseits eine Bewertung der Effektivität von Maßnahmen vornehmen zu können.

Nummer: 1 Verfasser: Röhlig Thema: Notiz Datum: 05.03.2019 15:40:57 +01'00'

Dem Verfasser ist bewusst, dass das StandAG das BfE (und nicht die BGE) als Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung vorsieht und auch nur dem BfE in den einschlägigen Paragraphen 5-7 und 9-11 entsprechende Aufgaben explizit zuweist. Trotzdem ist er überzeugt, dass Abschnitt 2.5.1 deutlich zu kurz greift: Allein eine "bessere" Kommunikation wissenschaftlich-technischer Sachverhalte wird den Herausforderungen der Standortauswahl nicht gerecht werden. Die Empfehlung ist, für jeden der in den Paragraphen 5-7 und 9-11 des StandAG genannten Verfahren / Instrumente / Gremien sollte die BGE a priori eine angemessene Strategie entwickeln. Dies erfordert eine frühzeitige Verständigung mit dem BfE: Was sind die Pläne und was sind die Erwartungen an den Vorhabenträger? Außerdem sollte die BGE den § (3) als Chance und Inspiration für ihr FuE-Programm sehen: "(3) Das Verfahren zur Beteiligung der Öffentlichkeit wird entsprechend fortentwickelt. Hierzu können sich die Beteiligten über die gesetzlich geregelten Mindestanforderungen hinaus weiterer Beteiligungsformen bedienen. Die Geeignetheit der Beteiligungsformen ist in angemessenen zeitlichen Abständen zu prüfen."

FuE-Bedarf:

- Kriterien zur Eingrenzung der zu untersuchenden Regionen und
- Kriterien zur Unterscheidung zwischen Auswirkungen, die auf der Auswahl als potenzieller Standort für ein Endlager beruhen und Auswirkungen, die auf anderen sozialen und wirtschaftlichen Tendenzen beruhen können (z. B. Strukturveränderungen der regionalen und überregionalen Wirtschaft, übergreifende demographische Prozesse)
- Metastudie über Methoden der Bewertung für die Entwicklung von Immobilienpreisen in möglichen Standortregionen (Furcht der Bevölkerung vor monetären Werteverlust)

Mit den Arbeiten zur Deckung dieses Forschungs- und Entwicklungsbedarfes ist unverzüglich zu beginnen.

3 Literaturverzeichnis

Das Literaturverzeichnis dieser Revision (00) wird nicht veröffentlicht, da es überarbeitet worden ist. Zur Nachvollziehbarkeit der Literaturzitate im Text wird auf das Literaturverzeichnis in Anhang 1 verwiesen.

Das Literaturverzeichnis dieser Revision (00) wird nicht veröffentlicht, da es überarbeitet worden ist. Zur Nachvollziehbarkeit der Literaturzitate im Text wird auf das Literaturverzeichnis in Anhang 1 verwiesen.

Das Literaturverzeichnis dieser Revision (00) wird nicht veröffentlicht, da es überarbeitet worden ist. Zur Nachvollziehbarkeit der Literaturzitate im Text wird auf das Literaturverzeichnis in Anhang 1 verwiesen.

Das Literaturverzeichnis dieser Revision (00) wird nicht veröffentlicht, da es überarbeitet worden ist. Zur Nachvollziehbarkeit der Literaturzitate im Text wird auf das Literaturverzeichnis in Anhang 1 verwiesen.

Das Literaturverzeichnis dieser Revision (00) wird nicht veröffentlicht, da es überarbeitet worden ist. Zur Nachvollziehbarkeit der Literaturzitate im Text wird auf das Literaturverzeichnis in Anhang 1 verwiesen.

Das Literaturverzeichnis dieser Revision (00) wird nicht veröffentlicht, da es überarbeitet worden ist. Zur Nachvollziehbarkeit der Literaturzitate im Text wird auf das Literaturverzeichnis in Anhang 1 verwiesen.

Anmerkungen des Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf:

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V.

Institut für Ressourcenökologie

*BGE Workshop: Forschungs- und Entwicklungsbedarf
Braunschweig, 19./20. März 2019*



Einführung

- Rahmenbedingungen/Vorgaben der Forschung:
 - StandAG
 - 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung
 - 4. Förderperiode der Programmorientierten Förderung der Helmholtz-Gemeinschaft (2021-2027):
 - Forschungspolit. Ziele des Forschungsbereichs Energie
- Aufbau eines „**Helmholtz Kompetenzzentrum**“ für die Entsorgung nuklearer Abfälle“ auf nationaler Ebene
- Institutionelle Partner: **BGE!**, Universitäten,...
- Wichtige sich daraus ableitende Forschungsfelder werden aus Sicht des HZDR nachfolgend kurz beschrieben.
- **Kontakt: Prof. Dr. Thorsten Stumpf – T.Stumpf@hzdr.de**

Bereich “Standortsuche Endlagerung”

Komplexe Anforderungen der Langzeitsicherheitsanalyse

- Identifizierung
 - Charakterisierung
 - Modell-Entwicklung
 - Parametrisierung
- ...von allen relevanten *thermodynamisch* und *kinetisch kontrollierten Prozessen* des *Transports von Radionukliden (RN)*

Molekulares Prozessverständnis im Nah- und Fernfeld

- Reaktivität von RN als Funktion der molekularen Struktur und Topologie
- Redoxprozesse von RN an Gesteins-/Wasser-/Biota-Grenzflächen
- Bildungsmechanismen von RN-haltigen Festphasen
- Radiobiologie im Nah- und Fernfeld eines nuklearen Endlagers
- Grundlagenforschung zur RN-Chemie



Reaktivität von Radionukliden (RN) als Funktion der molekularen Struktur und Topologie

Die chemische Speziation und daran gekoppelte Reaktivität wird maßgeblich von der molekularen Struktur bestimmt. Zudem sind an fest-flüssig-Grenzflächen die Topologie und Kristallinität der (mineralischen) Oberflächen essentiell.

- Charakterisierung und Quantifizierung von Oberflächenreaktivitäten, insbesondere als Funktion verschiedener Kristallstrukturen und Defekttypen
- Vergleich von advektivem mit diffusivem RN-Transport mit Identifizierung dominanter Fließpfade
- Upscaling reaktiver Transportmodelle auf Basis von Prozesskoppelung und Modellreduktion (dazu Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse)

Redoxprozesse von RN an Gesteins-/Wasser-/Biota-Grenzflächen

Die Mobilität mehrerer RN hängt sehr stark vom Oxidationszustand ab, welcher u.a. durch die Behälterkorrosion und mikrobiologische Prozesse mitbestimmt wird.

- Vertiefung der Kenntnisse zu Tc- und Pu-Verbindungen insbesondere niedriger Oxidationsstufen:
 - wässrige Speziation
 - Löslichkeit
 - Elektrochemie
 - Sorptionsverhalten

Bildungsmechanismen von RN-haltigen Festphasen

Die nachhaltigste Rückhaltung von RN ist deren Fixierung in Festphasen:

- Abfallmatrix
- Barrierematerial
- Wirtsgestein

- Schließung kritischer Lücken im Verständnis des Einbaus (und dessen Reversibilität) von vierwertigem Tc und Actiniden in Fe-Korrosionsprodukten und in Keramiken auf Basis von Zr, W und Mo
- Charakterisierung dieser Festphasen nach intensiver Strahlenexposition

Radiobiologie im Nahfeld eines nuklearen Endlagers

Im Wirtsgestein bereits vorhandene sowie anthropogen eingebrachte Mikrobiologie kann RN-Ausbreitung erheblich beeinflussen:

- Sekundärphasenbildung
- Kanister-Korrosion
- Gasbildung
- direkter Kontakt mit Mikroben

- Identifizierung mikrobieller Schlüsselorganismen, ihrer Aktivität und metabolischer Netzwerke in möglichen Endlagerformationen bezüglich dieser relevanten Prozesse
- Quantifizierung des Inventars an potentiellen Nährstoffen in möglichen Endlagern/-formationen (gasförmige, anorganische, organische Nährstoffe, Elektronendonatoren und -akzeptoren, C-, N-, P-, S-Quellen)

Radiobiologie im Fernfeld eines nuklearen Endlagers

Abschätzung von Umfang und Art eines potentiellen Eintrags von RN in die Nahrungskette.

- Untersuchung und Aufklärung von Eintrittspfaden/-formen von RN in die Biosphäre
- Transport der RN durch Organismen sowie ihrer möglichen Anreicherung in der Nahrungskette
- Vertieftes Verständnis der Biochemie Endlager-relevanter Actiniden hinsichtlich deren chemischer und radiologischer Toxizität
- Erweiterung der Modellierung von Geo-Prozessen um den Einfluss der Biologie (THMCB)

Grundlagenforschung zur RN-Chemie

Kritische Lücken in den chemischen Grundlagen erzeugen große Unsicherheiten in Grundannahmen der Langzeitsicherheitsanalyse (insbesondere bei Pu und Tc).

- Untersuchung der Bindungseigenschaften von Transuranen und Tc mit anorganischen, organischen Molekülen
- Bildung und Stabilität von Nanopartikeln der Actiniden unter umweltrelevanten Bedingungen.
- Weiterentwicklung und Kopplung komplementärer analytischer Techniken bezüglich mehrdimensionaler Systeme
- Verknüpfung mit Quantenchemie

Bereich “Zwischenlagerung und Transporte”

Sicherheitsnachweis für die verlängerte Zwischenlagerung jenseits der aktuellen Bewilligungsdauer von 40 Jahren.

- Verhalten von (simuliertem) abgebranntem Kernbrennstoff bezüglich Cladding-Stabilität, Versprödung, Oxidation, ...
- Auswirkungen auf die Stabilität (Lagerung, Handling, Transport)
- Untersuchung von möglichen Behälter- oder Cladding-Schädigungen unter Zwischenlagerbedingungen sowie nach Einbruch von Wasser
- Erweiterte Einblicke in Alterungs- und Degradierungsprozesse von abgebranntem Kernbrennstoff
- Auswirkungen der verlängerten Zwischenlagerung auf die Endlagerung

Bereich “Kerntechnische Sicherheit, Stilllegung und Rückbau”

Verringerung der radiologischen Risiken, Reduktion der Kosten und Erhöhung der Prozesseffizienz beim Rückbau kerntechnischer Anlagen.

- Entwicklung und Validierung prognostischer Verfahren (z.B. basierend auf Neutronenfluss-Rechnungen) zur Abfallminimierung und Prozessoptimierung
- Untersuchungen zur RN-Bindung und zum Löseverhalten an realen Proben (Reaktordruckbehälter, Bioschild)
- Untersuchung und Modellierung geeigneter Systeme zur Phytoremediation kontaminierter Standorte

Anmerkungen von Herrn Dr. Götter:

Von: [Christian Götter](#)
An: [Veranstaltung BGE](#)
Betreff: Re: Freundliche Erinnerung: Einladung BGE-Workshop Forschungsbedarf Standortauswahl
Datum: Freitag, 8. März 2019 09:37:01

Sehr geehrte Damen und Herren,

vielen Dank für Ihre Einladung und die Erinnerung an diese.

Eine Anregung zum Forschungsbedarf: Es wäre empfehlenswert, die beim Punkt 'Sozialwissenschaften' genannte historische Dimension der Debatte in der Bundesrepublik Deutschland separat zu erforschen (sprich: 'Geschichtswissenschaft' als eigenständigen Punkt in das Program aufzunehmen) und die Ergebnisse beim weiteren Vorgehen zu berücksichtigen, um zu vermeiden, dass Fehler der Vergangenheit wiederholt werden, was aus meiner Sicht mit Blick auf die aktuellen Formulierungen mit Blick auf die gesellschaftliche Ebene zu erwarten wäre.

Leider werde ich persönlich an dem Workshop nicht teilnehmen können.

Ich wünsche Ihnen eine produktive und erfolgreiche Veranstaltung.

Mit besten Grüßen,
Ihr
Christian Götter

Anmerkungen von Herrn Prof. Dr. Kaus und Herrn Dr. Baumann:

Von: [Kaus, Boris](#)
An: [Veranstaltung BGE](#)
Cc: [Kaus, Boris](#); [Baumann, Tobias Samuel](#)
Betreff: Re: Einladung BGE-Workshop Forschungsbedarf Standortauswahl
Datum: Freitag, 8. März 2019 12:41:30

Sehr geehrte Damen und Herren,

Ich selber (Prof. Boris Kaus) und Dr. Tobias Baumann (in cc) vom Institut für Geowissenschaften, der Johannes-Gutenberg Universität Mainz möchten gerne teilnehmen. Selber kann ich aus terminlichen Gründen aber leider nur am 19. März kommen.

Falls nicht bereits eingebracht, möchten wir anstoßen den „Umgang und Auswirkungen von Unsicherheiten von Unsicherheiten in Gesteinsparametern“, in die Diskussion mit aufzunehmen:

Umgang und Auswirkungen von Unsicherheiten in Gesteinsparametern

Uns ist insbesondere bei vergangenen Tagungen im Bereich der Salz-, Gesteins- und Reservoirmechanik aufgefallen, dass bei vielen numerischen Simulationen Unsicherheiten in den implementierten Materialgesetzen, Gesteinseigenschaften und der Modellgeometrie wenig bis keine Berücksichtigung finden. Begründet wird dies häufig mit der langen Rechenzeit, die für die numerische Modelle benötigt wird. Aus unserer Sicht darf dies keine Rechtfertigung sein und es sollte darüber diskutiert werden, ob nicht gewisse Richtlinien über den Umgang mit Unsicherheiten bei numerischen Modellen festgelegt werden sollten.

Insbesondere ist festzustellen, welche Auswirkungen Unsicherheiten der numerischen Berechnungen und der Gesteinsparameter auf der langfristige Sicherheit von Endlagern haben. Aus unserer Sicht ist es zwingend notwendig unsichere Gesteinseigenschaften in den numerischen Modellen zu variieren und auch bei den implementierten Materialgesetzen die Unsicherheiten der Laboruntersuchungen (Größen- und Zeitskala) mit zu berücksichtigen.

Rheologische Materialgesetze die im Labor bestimmt werden, werden über bis zu 10 Größenordnungen (Deformationsrate) extrapoliert. Beispiele aus der Literatur (z.B. bei Salz) zeigen, dass es deutliche Diskrepanzen geben kann. Es ist aus unserer Sicht daher notwendig neben der Charakterisierung der Mikrostruktur von Gesteinen, auch makroskopische In-situ-Beobachtungen mit numerischen Modellen abzugleichen, die die geodynamische Entwicklung auf (realistischer) längerer Zeitskala abbilden können.

Mit freundlichen Grüßen,

Prof. Boris Kaus
Dr. Tobias Baumann

Anmerkungen der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH:

Forschungs- und Entwicklungsbedarf Standortauswahlverfahren der BGE - Kommentare des GRS-Bereichs Endlagerung

Braunschweig, 08.03.2019

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) hat ihren Forschungs- und Entwicklungsbedarf als Vorhabenträgerin nach Standortauswahlgesetz zusammengestellt und am 26.02.2019 als Grundlage für einen fachlichen Diskurs u.a. dem GRS-Bereich Endlagerung zugesendet. Am 20./21.03.2019 findet ein Workshop der BGE mit eingeladenen Fachleuten statt, in dem der F&E-Bedarf diskutiert werden soll.

Zur Vorbereitung dieses Workshops sind die Teilnehmer eingeladen, bereits vorab Input zu verschiedenen Fragestellungen zu liefern. Im vorliegenden Dokument sind erste Anmerkungen und Empfehlungen des Bereichs Endlagerung der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH zusammengestellt, die aber aufgrund des engen Zeitrahmens nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erheben und Aspekte auch nur anreißen können.

1 Allgemeine Anmerkungen

- Das Dokument ist thematisch in seinen Haupt- und Unterkapiteln klar gegliedert. Alle relevanten Themenbereiche, zu denen F&E-Bedarf seitens der BGE für die Umsetzung des Standortauswahlverfahrens bestehen könnte, sind enthalten.
- In den Kapitel 2.1 bis 2.4 und den zugehörigen Unterkapiteln werden jeweils die Untersuchungsthemen in Tabellenform den verschiedenen Phasen des Standortauswahlprozesses zugeordnet. Diese Darstellung ist grundsätzlich sinnvoll und hilfreich, da auf diese Weise erkennbar wird, zu welchem Zeitpunkt die Erkenntnisse bzw. Ergebnisse der F&E-Arbeiten vorliegen müssen.

Die Bedeutung der Spalte Grundlagenforschung in den Tabellen ist nicht erläutert, sodass unklar bleibt, ob die Bearbeitung dieser Untersuchungsthemen zunächst über andere Förderwege (z.B. BMBF oder BMWi) vorangetrieben werden soll.

Wünschenswert wären orientierende Einschätzungen der BGE zum Zeitbedarf für die Durchführung der F&E-Arbeiten. Aus solchen Angaben lässt sich in Verbindung

mit dem Zeitpunkt, zu dem die Ergebnisse vorliegen sollen, ableiten, wann die F&E-Arbeiten begonnen werden müssen. (Empfehlung: Bei der Überarbeitung des Dokumentes entsprechende Einschätzungen vornehmen).

- Die Zuordnung der Untersuchungsthemen zu den Wirtsgesteinen ist wichtig, allerdings ist diese Zuordnung nicht immer richtig oder vollständig. So wird z.B. im Kap. 2.2.6.2 der Umgang mit Modellunsicherheiten nur für Tongestein aufgeführt. Tatsächlich betrifft dieser Aspekt alle Wirtsgesteine und stellt auch eine zentrale Fragestellung in den Sicherheitsuntersuchungen dar.
- Die Zuordnung der Kreuze in den Tabellen ist nicht immer nachvollziehbar bzw. nicht immer konsistent mit den Aussagen im Text. Beispielsweise sind in Tab. 2, Zeile 2 nur zwei Kreuze gesetzt, obwohl die Spezifizierung des Informationsbedarfs für die dreistufigen Untersuchungen erfolgen soll.
- Die Texte in den einzelnen Unterkapiteln erläutern bzw. untermauern nicht immer die in den Tabellen aufgeführten Untersuchungsthemen. Teilweise sind Textpassagen den falschen Überschriften (Wirtsgesteinen), bzw. allgemeine Erläuterungen den wirtsgesteinsspezifischen Überschriften zugeordnet.
- Zu begrüßen ist der Ansatz, für die verschiedenen Themenbereiche relevante F&E-Vorhaben, auf denen die derzeitigen Kenntnisse basieren, aufzuführen. Dieser Ansatz ist derzeit noch nicht durchgängig umgesetzt. In den nachfolgenden spezifischen Anmerkungen sind deshalb aus unserer Sicht wichtige F&E-Vorhaben genannt.
- Um Missverständnissen vorzubeugen, regen wir an, im gesamten Text klar definierte Begrifflichkeiten zu verwenden und auf unbestimmte Begriffe wie z.B. „Suchkriterien“ oder „Prognosezeitraum“ nach Möglichkeit zu verzichten.
- Wir empfehlen, das Dokument noch einmal vollständig redaktionell zu überarbeiten. Des Öfteren schienen erläuternde Passagen zu den Untersuchungsthemen nicht dem richtigen Unterkapitel zugeordnet zu sein, was die Nachvollziehbarkeit des angegebenen F&E-Bedarfs und die Lesbarkeit des Textes deutlich erschwert. Außerdem sind eine ganze Reihe von Literaturzitaten nicht im Literaturverzeichnis aufgeführt. Beispielsweise seien hier Alt et al. 2009, DepV 2017, Itasca 2005, Kienzler et al. 2012b, Müller 2016, Müller-Hoeppe 2012a, Orzechowski et al. 2018, Press et al. 2008 und Pruess et al. 2012 genannt.

2 Spezifische Anmerkungen

Nachfolgend werden stichwortartig Punkte zu einzelnen Themenbereichen aufgeführt, die aus Sicht der GRS modifiziert bzw. ergänzt werden sollten. Die Auflistung orientiert sich weitgehend an der Kapitelstruktur des BGE-Berichts. Dabei werden z.T. auch Aspekte verdeutlicht, die bereits in allgemeiner Form in Kap. 1 dargestellt sind. Die Zusammenstellung soll die BGE bei der Vorbereitung und Durchführung des Workshops unterstützen und kann Hinweise zur Strukturierung der geplanten Arbeit in den drei Foren geben.

2.1 Inventar an radiotoxischen und chemotoxischen Abfällen

- Prognose der Mengen und Radionuklidinventare der sonstigen Abfälle, die laut dem Nationalen Entsorgungsprogramm neben den Wärme entwickelnden, radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen beim Standortauswahlprozess zu berücksichtigen sind.

Sonstige Abfälle = radioaktive Abfälle aus der Schachanlage Asse-II, das angefallene und anfallende abgereicherte Uran aus der Urananreicherung und Abfälle, die nicht im Endlager Konrad eingelagert werden können. Prognose der Abfallmengen und Inventare schwierig. Diese Abfälle führen zu einem deutlich größeren Flächenbedarf des Endlagers, relevant für Bewertung in Frage kommender Standorte.

2.2 Geowissenschaftliche Fragestellungen

Die Zuordnung der Textpassagen zu den Wirtsgesteinen ist im Kap. 2 teilweise fehlerhaft.

2.2.1 Standortinformationen

- Im Rahmen der untertägigen Erkundung werden standortspezifische Daten erhoben, die in die umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen einfließen. Auch hierzu ist der jeweilige geowissenschaftliche Informationsbedarf vorab zu spezifizieren.

2.2.2 Geowissenschaftliche Prognose

- Allgemeine Aussagen sollten übergeordnet – und damit unabhängig von den Wirtsgesteinen – aufgeführt werden, wie z.B. der 2. Absatz beim Abschnitt zum Steinsalz oder die Aussage zum Verständnis der glazialen Prozesse.
- Das Untersuchungsthema „Ausweitung der vorliegenden geowissenschaftlichen Langzeitprognosen [...] auf ganz Deutschland“ könnte dahingehend eingegrenzt werden, dass nur die Regionen zu betrachten sind, die nach Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen verbleiben.
- Bei den geowissenschaftlichen Langzeitprognosen sind alle relevanten geologischen und klimatischen Entwicklungen zu berücksichtigen, also neben den eiszeitlichen Veränderungen auch Auswirkungen warmzeitlicher Episoden wie z.B. der Anstieg des Meeresspiegels.
- Die aufgeführten relevanten Prozesse sind z.T. den falschen Wirtsgesteinen zugeordnet bzw. stehen bei einem Wirtsgestein gelten aber auch für andere. So sind beispielsweise subglaziale Rinnenbildungen auch für Endlagersysteme mit Tongesteinen sicherheitsrelevant und die Kenntnisse dazu zu vertiefen. Subrosion und Diapirismus sind dagegen nur für Endlagersysteme mit dem Wirtsgestein Steinsalz relevant.
- Es sollte überprüft werden, ob zum Thema kryogene Risse im Steinsalz wirklich noch Untersuchungsbedarf besteht.

2.2.3 Geologische Modelle

- Im Text wird allgemein „(struktur-) geologische Modelle“ als Überbegriff verwendet. Die Erläuterungen beziehen sich jedoch für Steinsalz teilweise auf spezielle (THMC)-Prozesse.
- Auf hydrogeologische Modelle wird in diesem Kapitel sowie im gesamten Dokument nicht eingegangen. Hydrogeologische Modelle werden in Sicherheitsuntersuchungen eingesetzt, weshalb ein entsprechender F&E-Bedarf zu Modellen sowie zur Weiterentwicklung und Anpassung der zur Verfügung stehenden Rechencodes in Tabelle 4 aufgenommen und im Text erläutert werden sollte.
- Die VIRTUS-Plattform ist nicht wirtsgesteinsspezifisch sondern grundsätzlich für alle Wirtsgesteine nutzbar, sie wird jedoch unter Tongestein aufgelistet. Der Programmcode wurde von Fraunhofer IFF in Magdeburg im Unterauftrag der GRS gGmbH im

Rahmen eines BMWi-geförderten F&E-Vorhabens entwickelt, das GRS in Zusammenarbeit mit BGR und DBE Technology GmbH durchgeführt hat.

2.2.4 Referenzdatensatz

- Es sollte noch dargestellt werden, dass die Datensätze im Zuge des Standortauswahlverfahrens durch Ergebnisse der übertägigen und später der untertägigen Erkundung ergänzt bzw. angepasst werden und die Basis für die verschiedenen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen darstellen.

2.2.5 Erkundungsprogramm und Erkundungsmethoden

- Die Entwicklung eines Erkundungsprogramm für Kristallin sollte der übertägigen und untertägigen Erkundung zugeordnet sein.
- In Tabelle 6 sollte die Beschreibung von Kluffnetzwerken und die Ableitung von Datensätzen bzw. die Entwicklung eines dazu geeigneten Erkundungsprogramms als Untersuchungsthema aufgenommen werden.

2.2.6 Integritätsnachweis geologische Barrieren

- Die Wiedergabe der Aussagen der BMU-Sicherheitsanforderungen sollte exakt erfolgen, z. B. werden in den Sicherheitsanforderungen keine „Integritätskriterien“ definiert.
- Die Unterkapitel sollten idealerweise aufeinander aufbauen. Für Steinsalz werden zwar nachweisrelevante Prozesse in Kap. 2.2.6.1 aufgelistet, dann aber kein Bezug darauf in der mathematischen Abbildung der Modelle (Kap. 2.2.6.2) genommen.
- Während in der Überschrift die geologische Barriere genannt ist, wird im nachfolgenden allgemeinen Text Bezug auf den ewG genommen. Dementsprechend werden schwerpunktmäßig THM(C)-Prozesse behandelt, und relevante Prozesse für das Deckgebirge vernachlässigt. Da das Kapitel sich auf die geologische Barriere und damit keineswegs nur auf den ewG beziehen sollte, sind auch Prozesse im Deckgebirge und deren mathematische Abbildung in Modellen von Bedeutung. Auch in diesem Kapitel wird die hydrogeologische Modellierung nicht erwähnt. Für Kristalline sollte im Kapitel 2.2.6.2 zum Beispiel die Entwicklung einer Modellierungsstrategie und ggf. im Kap. 2.2.6.3 die Anpassung vorhandener Codes aufgenommen werden.

- Unklar ist, warum der Umgang mit Unsicherheiten nur auf Tongestein bezogen wird. Gerade im Kristallin wird im Standortauswahlverfahren aufgrund der Diskontinuitäten mit Unsicherheiten umzugehen sein.
- Wir empfehlen zu überprüfen, ob es für Steinsalz tatsächlich, wie in Tabelle 8 dargestellt, keinen F&E-Bedarf zur mathematischen Abbildung von Prozessen (Stoffmodelle) gibt. Die Ausführungen im Text dazu ergeben ein etwas anderes Bild.
- Bezüglich der Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise (Kap. 2.2.6.3) steht ein allgemeiner Text unter der Überschrift „Tongestein“.

2.3 Endlagerkonzepte

Das Kapitel unterscheidet sich deutlich von den anderen Kapiteln in dem Bericht. Die Ausweisung der Untersuchungsthemen ist erheblich detaillierter, was auch an der Zahl der in den Tabellen aufgeführten Untersuchungsthemen ablesbar ist. Der Themenbereich Endlagerkonzepte umfasst 16 Seiten, während der inhaltlich deutlich umfangreichere Themenbereich Geowissenschaftliche Fragestellungen nur auf 13 Seiten abgehandelt wird.

Die genannten Untersuchungsthemen sind sehr spezifisch und detailliert auf einzelne Fragestellungen ausgerichtet (zum Beispiel im Kap. 2.3.2 das Untersuchungsthema „Modellierung von Wärmestrahlung und Konvektion in einem unverfüllten Bohrloch (horizontale Bohrlochlagerung)“ beim Tongestein). Auch die Texte zur Begründung der jeweiligen Untersuchungsthemen sind deutlich umfangreicher als sonst.

- Es wird empfohlen, den Detaillierungsgrad in diesem Kap. zu reduzieren und an die anderen Themenbereiche anzupassen.

2.4 Sicherheitsbetrachtungen

Viele Textpassagen in Kapitel 2.4 stehen nicht unter den Überschriften, die zu erwarten wären. Deshalb sind die nachfolgenden Anmerkungen zu den Textstellen nur gelegentlich mit Bezug zu den Unterkapiteln im BGE-Bericht dargestellt.

Viele Textblöcke sind den falschen Wirtsgesteinen zugeordnet bzw. stehen nur bei einem Wirtsgestein, gelten aber auch für andere. Wichtige Beispiele:

- S. 58: Anders als der Text nahelegt, sind die Szenarien für einen Ausfall der Endlagerbehälter nicht nur für Steinsalz sondern für alle Wirtsgesteine relevant, ebenso wie die Frage einer Sorption von Radionukliden an den Korrosionsprodukten der Behältermaterialien. Insbesondere im Kristallingestein (vor allem bei Umsetzung des Konzeptes der einschlusswirksamen Barrieren, ewB) ist die Versagenswahrscheinlichkeit der Behälter die alles entscheidende Frage für den Nachweis der langfristigen Sicherheit des Endlagersystems.
- S.58: Die Frage zur Quantifizierung der Anteil der Radionuklide, die unmittelbar nach einem Kontakt der Brennelemente mit Grundwässern freigesetzt werden (Instant Release Fraction), ist für alle Wirtsgesteine relevant.
- S.62: Der Text unter Tongestein gilt für alle Wirtsgesteine, die Entwicklung von NaTREND und des Smart-K_D-Konzeptes ist für alle Wirtsgesteine essentiell.

Die Unsicherheitsanalyse (im Sinne der Analyse der Ungewissheiten und Sensitivitäten im System) ist ein wesentlicher Bestandteil des Sicherheitsnachweis (BMU 10) und bleibt ohne Erwähnung bei der Beschreibung des FuE-Bedarfs zu den Sicherheitsbetrachtungen in der Nachverschlussphase. Gerade in diesem Bereich besteht aber ein hoher Bedarf an FuE-Arbeiten mit folgenden Zielsetzungen:

- Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Ungewissheiten („Umgang mit Ungewissheiten“),
- Einsatz von probabilistischen Methoden im Sicherheitsnachweis
- Berücksichtigung von Datenungewissheiten, Vorgehensweisen zur Ableitung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von Parameterwerten aus vorhandenen Daten und für den Fall, dass keine Daten oder nur wenige Datenpunkte vorliegen.
- Methoden zur Durchführung von globalen Sensitivitätsanalysen, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Ungewissheiten einschätzen zu können (BMU 10).
- Methode zur Berücksichtigung von Modellungewissheiten (BMU 10),
- Übertragung von Ungewissheiten aus Prozessmodellen/Detailmodellen auf die integrierte Langzeitsicherheitsanalyse
- Ermittlung von Medianwerten o.Ä. für die in (BMU 10) geforderten deterministischen Rechnungen auf der Basis einer möglichst realitätsnahen Modellierung

- Entwicklung von methodischen Vorgehensweisen zur Durchführung von realitätsnahen Modellierungen.

Neben der Methodik zum Umgang mit Ungewissheiten stellt die Kommunikation der Ungewissheiten eine große Herausforderung dar. Hier spielt vor allem die Bewertung der Relevanz der Ergebnisse probabilistischer Analysen für die Sicherheitsaussage eine zentrale Rolle. Eine entsprechende Vorgehensweise dazu fehlt.

Ein wesentlicher Aspekt, der im Steinsalz die Integrität der geotechnischen Barrieren (Kap. 2.4.3) bestimmt, ist die Wechselwirkung mit zutretenden Lösungen. Das grundsätzliche Verständnis für die ablaufenden Prozesse ist bereits vorhanden. Analog zu den Empfehlungen der ESK zum ERAM sollte hier der unterschiedlichen mineralogischen Zusammensetzung der zutretenden Gebirgslösungen standortspezifisch Rechnung getragen werden (= Teil der Forschung zur Standortauswahl).

- Für den Sonderfall der Kontaktzone existieren aufgrund von F&E-Vorhaben (LAVA, LASA) erste orientierende Modellansätze, in denen ein zukünftiger Handlungsbedarf aufgezeigt worden ist. Im Rahmen des derzeit laufenden FuE-Vorhabens THYMECZ wird ein iterativer Modellierungsansatz mittels vollständig gekoppelter THMC-Prozesse verfolgt. Abhängig von den Ergebnissen sind ggf. weitergehende Untersuchungen zur Verbesserung des Verständnisses der ablaufenden Prozesse und ihrer Kopplungen durchzuführen, begleitend dazu die Modellansätze zu ergänzen und die Rechenprogramme zur Modellierung anzupassen.
- Stoffmodelle zur Beschreibung des gekoppelten Materialverhaltens von Bentonit sind immer noch Gegenstand von FuE-Aktivitäten im nationalen und internationalen Rahmen (= Grundlagenforschung, z.B. nationales F&E-Vorhaben UMB). Die frühzeitige Festlegung auf ein (in ausreichender Menge verfügbares) Referenzmaterial, das in Deutschland für Endlagersystemen in Unterkreidetonformationen in Frage kommt, wäre wünschenswert zur zielgerichteten Durchführung weiterer F&E-Arbeiten (siehe dazu Seite 51 im Abschnitt zum Tongestein: Referenzlösung und als Referenz für Dichteelemente verwendete Ca-Bentonit).

Der Begriff TH2M-gekoppelt (S. 53 unten) ist im Zusammenhang mit Simulationswerkzeugen nicht international etabliert, vielmehr werden mit der allgemein üblichen Bezeichnung THM-Kopplung sowohl Einzelphasen- als auch Mehrphasenströme in Wechselwirkung mit thermischen und mechanischen Einwirkungen beschrieben. Eine weitere Unterscheidung durch zusätzliche Zahlen ist daher nicht notwendig.

- Die zum Kristallingestein angesprochenen Simulationsprogramme TOUGH2-FLAC3D und OGS arbeiten auf der Basis der Kontinuumsmechanik. Für Kristallingesteine typische Kluftstrukturen und Netzwerke können mit diesen Modellen nur über Umwege beschrieben werden.

Im Unterkapitel zu den radiologischen Konsequenzenanalysen (Kap. 2.4.4) gibt es keine Aussagen zur Bedeutung von Transportprozessen (Diffusion, Zweiphasenfluss) im kompaktierenden und letztlich kompaktierten Salzgrus. Der Kompaktionsprozess von Salzgrus hat eine hohe Relevanz für den Radionuklidtransport und damit für die radiologische Konsequenzenanalyse in Steinsalz; zu diesem Untersuchungsthema besteht FuE-Bedarf.

Die Bedeutung von Kolloiden für die Ausbreitung von Radionukliden wird nicht thematisiert. Kolloidbildung und -transport sind nicht nur für den Massenverlust bei Verschlussbauwerken relevant (Aussage S. 59); in Ton- und Kristallingestein können sie auch erheblich zur Ausbreitung von Radionukliden beitragen, sodass diese Prozesse über derzeit laufende F&E-Vorhaben (KOLLORADO-e2) hinaus weiter zu untersuchen sind.

In allen Wirtsgesteinen sind Kritikalitätsbetrachtungen (Kap. 2.2.5) nicht nur am oder im Behälter von Bedeutung, auch Akkumulationen durch Transport und Ausfällung von Radionukliden an anderen Stellen im Endlagersystem sind zu berücksichtigen. Eine gesamtheitliche Methode zur Vorgehensweise zum Ausschluss der Kritikalität existiert bisher nicht.